МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Національної металургійної академії України, спеціалізована вчена рада

Д08.084.02 Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця

На правах рукопису

КЛЕМЕШОВ ЄВГЕН СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.735.5

ДИСЕРТАЦІЯ

Розвиток теоретичних та технологічних основ металозаощаджувального процесу кування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів

Спеціальність 05.03.05 - «Процеси та машини обробки тиском»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Клемешов Є.С.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент Чухліб Віталій Леонідович

Дніпро – 2018 р.

АНОТАЦІЯ

Клемешов Є.С. Розробка теоретичних та технологічних основ металозаощаджувального процесу кування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском». – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2019.

Дисертація присвячена визначенню основних закономірностей формозміни металу при використанні тонкого деформуючого інструменту, а також визначенню деформаційних умов максимального наближення форми і розмірів поковки до готового виробу та створенню удосконаленої технології одержання поковок деталей типу «колінчастий вал».

На основі літературного огляду сучасного стану розробок в галузі виготовлення поковок колінчастих валів, виявлено, що на сьогоднішній день існує багато способів виробництва, до яких відносять такі основні способи, як штампування, метод висаджування-гнуття (TR-метод) та метод вільного кування. До поковок пред’являють вимоги до якості, до яких входить точність геометрії та необхідний рівень механічних властивостей. Точність геометрії має важливу роль при штампуванні та виготовленні за TR-методом, однак при вільному куванні має не таке важливе значення, так як у подальшому з поковки знімають шар металу механічною обробкою. Механічні властивості при цьому формуються, у більшій мірі, саме при куванні. Послідуюча термічна обробка лише згладжує нерівномірність їх розподілення, та трохи поліпшує їх. Штампування та TR-метод, застосовуються при серійному виробництві та мають обмеження по масі поковок. Метод вільного кування, на відміну від попередніх, застосовується, в більшості випадків, при одиничному виробництві та дозволяє виготовляти великогабаритні поковки, маса яких більше 2 тон, при цьому геометрія коліна валу майже не

обмежена. Однак це досягається за рахунок значних витрат металу, яким, у вигляді напуску, закривається коліно для спрощення форми поковки. Це викликано тим, що деформуючий інструмент (бойки) має завелику ширину для кування шатунної шийки. При застосуванні більш «тонкого» деформуючого інструменту можливе кування шатунної шийки великогабаритного колінчастого валу, що дозволить заощаджувати метал за рахунок наближення форми поковки до готової деталі, однак на даний час не існує наукових досліджень в цій області, а саме невідомі закономірності зміни геометричних параметрів заготовки під час кування шатунної шийки при використанні «тонких» бойків. Також, при дослідженнях гарячої обробки металів тиском, на даний час все більш розповсюдженим стає дослідження цих процесів за допомогою прикладних програм на базі скінченно-елементного методу. Це дозволяє в повній мірі, хоча і з деякими припущеннями, розглядати процеси деформування з середини, із можливістю оцінки напружено-деформованого стану. При експериментальних дослідженнях використовуються також фізичні моделі, на основі теорії подібності, які дозволяють оцінити формозміну металу за формозміною досліджуваних зразків, які мають однакову природу, але різні кількісні характеристики. За реологічними характеристиками визначено схожість досліджуваної марки сталі 40ХН2МА та свинцевого сплаву марки С1. Ці методи дослідження використано в роботі.

В роботі використано також вдосконалений метод оцінки нерівномірності деформації. Цей метод розроблено у співавторстві, а подальший розвиток методу наведено в даній роботі. Суть вдосконалення полягає у іншому способі обробки даних, а саме в урахуванні різниці між середнім значенням коефіцієнта нерівномірності по перерізу поковки та значеннями цього параметру в певних точках перерізу. Це дозволяє узгодити рівень оцінюваної нерівномірності деформації по перерізу з її кількісним вираженням, а також адекватно оцінити величину нерівномірності. Далі, на основі аналізу технології виробництва поковок колінчастих валів, розроблено план експерименту, який складається з дев’яти дослідів. Заготовкою є циліндр, розміри якого вибрано на основі реального процесу кування з урахуванням масштабу. Діаметр заготовки складає 40 мм, а довжина 80

мм. В якості факторів впливу вибрано два параметри, а саме товщину деформуючого інструменту та глибину його вдавлювання. Товщина деформуючого інструменту вибрано в інтервалі 0,1..0,3 від діаметра заготовки, що є тоншим ніж ті бойки, що використовуються на підприємстві. Глибина вдавлювання, яка відповідає ступеню деформації, складає 30..70%. На основі складеного плану експерименту проведено фізичне моделювання процесу вдавлювання бойка в заготовку із свинцю марки С1. Для цього виготовлено зразки та інструмент необхідних розмірів, та проведено дослідження на базі лабораторії кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова. Проаналізовано формозміну отриманих після деформування зразків та побудовано залежності зміни геометричних параметрів, таких як ефективний діаметр коліна, довжина зони контакту заготовки з нижнім та верхнім деформуючим інструментом та максимальне поширення металу в зоні формування шатунної шийки, від товщини деформуючого інструменту та глибини вдавлювання його в заготовку. Форма поковки відображає те, що вибрані інтервали параметрів деформування є вірними, тобто при товщині інструменту більше ніж 0,3 від діаметра заготовки, виникає сильне викривлення поковки, а при товщині менше ніж 0,1 від діаметра заготовки, існуватиме можливість нестійкості та навіть руйнування інструменту. При глибині вдавлювання менше 30% така схема кування не є ефективною, а більше 70% відбувається значне викривлення заготовки. Таким чином, отримано залежність зміни величини ефективного діаметра коліна від вказаних параметрів кування у місцях формування шатунної шийки колінчастого валу. Це дозволяє призначати, при певній товщині деформуючого інструменту, рівень обтиснення для формування необхідного діаметра шатунної шийки та щок валу у місці розташування коліна.

Так як подальше моделювання та аналіз процесу кування шатунної шийки відбуватиметься у прикладній програмі QForm, то для аналізу точності комп’ютерної моделі проведено моделювання процесу вдавлювання бойка в заготовку. Згідно із планом експерименту побудовано комп’ютерну модель для дев’яти дослідів і проведено розрахунок. Отримані дані проаналізовано за тією ж схемою та співставлено із результатами фізичного моделювання. Оцінка

розбіжності даних показала, що похибка складає не більше 10%, що є задовільним результатом для цього дослідження, і таким чином, можливе продовження досліджень із використанням комп'ютерного моделювання для процесу кування шатунної шийки колінчастого валу.

Для кування шатунної шийки «тонкими» бойками використано такі самі параметри процесу, однак на даному етапі присутні багаторазові обтиснення, тобто при застосуванні розробленої схеми кантувань, яка включає в себе від двох до чотирьох обтиснень з кантуванням на 90° (кількість обтиснень залежить від ступеню деформації при вдавлюванні бойка в заготовку), для отримання в перерізі шатунної шийки квадрата, після чого слідує два обтиснення із кантуванням на 45° та 90°, для отримання в перерізі шатунної шийки восьмикутника, а після цього слідує десять малих обтиснень із кантуванням заготовки на 15° для того, щоб в перерізі шатунна шийка набула форму кола. Отримуваний діаметр шатунної шийки дорівнює 0,3..0,7 від діаметра заготовки. При цьому проаналізовано формозміну металу та визначено закономірність зміни довжини шатунної шийки від досліджуваних параметрів кування. Використання комп'ютерного моделювання дозволило оцінити напружено-деформований стан поковки та розподілення температури в процесі кування. Температурне поле, в даному випадку показує, що в місці формування шатунної шийки виникає деяке незначне зниження температури, але в процесі кування температура поверхні заготовки вирівнюється, за рахунок більш гарячих внутрішніх шарів металу. Оцінка напруженого стану проводилася через аналіз розподілення середніх напружень в поковці. Цей аналіз довів, що обрана схема кування шатунної шийки є найбільш раціональною, на підставі того, що при вдавлюванні бойка відбувається незначне викривлення поковки внаслідок стискаючих напружень на контакті заготовки та верхнього бойка, а при послідуючому кантуванні, в наслідок розтягуючих напружень, заготовка вигинається у зворотному напрямку і знову стає прямолінійною, і ця прямолінійність зберігається до кінця процесу кування, внаслідок симетричності прикладення деформуючої сили. Також, за вдосконаленим методом оцінювання нерівномірності деформації проведено аналіз розподілення деформацій в шатунній шийці колінчастого валу.

На основі результатів проведених досліджень, розроблено вдосконалену технологію виготовлення поковок великогабаритних колінчастих валів. На основі отриманих закономірностей формозміни металу, розроблено рекомендації по застосуванню «тонкого» деформуючого інструменту, а також, з використанням вдосконаленого методу визначення нерівномірності деформації для певної довжини шатунної шийки визначено кількість обтиснень, кантувань та рівнів ступеню деформації. Це дозволяє обрати варіант деформування (схеми кування) з мінімальною нерівномірністю деформацій металу в місці формування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів.

Ключові слова: великогабаритний колінчастий вал, шатунна шийка, тонкий бойок, вдавлювання, формозміна, нерівномірність

ABSTRACT

Klemeshov Y.S. Development of theoretical and technological fundamentals of the metal-saving forging process of crankpin of large-sized crankshafts. – Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.03.05 "Processes and machines of pressure treatment". - National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2018.

The dissertation is devoted to the determination of the basic regularities of metal forming when using a thin deforming tool, as well as to determine the deformation conditions of the maximum approximation of the shape and size of forging to the finished product and to create an advanced technology for the production of forgings of parts the type "crankshaft"

On the basis of a literary review of the current state of developments in the field of manufacturing forgings of crankshafts, it has been found that today there are many methods of production, which include such basic methods as closed-die forging, bending-

upsetting method (TR method) and the method of free forging. Forgings impose requirements for quality, which include the accuracy of geometry and the required level of mechanical properties. The accuracy of geometry plays an important role in stamping and manufacturing by the TR method, but with free forging, it is not so important, since later some metal layer removed from forgings by mechanical treatment. In this case, mechanical properties are formed, to a greater extent, precisely during forging. The subsequent thermal treatment only smooths the uneven distribution of them and slightly improves them. Closed-die forging and TR-method are used for serial production and have limitations on forging masses. The method of free forging, unlike the previous one, is used, in most cases, in single production and allows the production of large-sized forgings, the mass of which exceeds 2 tons, with the geometry of the shaft's knee which is almost unlimited. However, this achieved at the expense of significant metal costs, which, in the form of overlap, closes the knee to simplify the forging pattern. This is due to the fact that the deforming tool (forging dies) has an excess width for forging the crank pin. When applying a more "thin" deforming tool, it is possible to forge a crank pin of a large crankshaft, which will save metal due to the approaching form of forging to the finished part, but at the present time there is no scientific research in this area, namely, the unknown patterns of changing the geometric parameters of the workpiece during forging a crank pin with the use of "thin" forging dies. Also, in researches of hot metal deformation, nowadays it is becoming more widespread to study these processes using applications based on the finite-element method. This allows, in full measure, though with some assumptions, to consider processes of deformation from the middle, with the possibility of assessing the stress-strain state. In experimental studies, physical models are also used, based on the theory of similarity, which allow us to estimate the shape of the metal according to the shape variation of the investigated samples of the same nature, but different quantitative characteristics. According to the rheological characteristics was determined the similarity of the studied steel 40XH2MA and lead alloy C1. These research methods are used in the work.

An improved method for estimating strain unevenness is also used in the work. This method is developed in co-authorship, and further development of the method is given in

this paper. The essence of the improvement lies in a different method of data processing, namely, taking into account the difference between the mean values of the unevenness factor on the cross-section and the values of this parameter at certain points of the cross-section. This allows us to reconcile the level of the estimated unevenness of the deformation along the section with its quantitative expression, and also to adequately estimate the magnitude of the unevenness. Further, on the basis of the technology analysis of crankshafts forgings production, an experiment plan, consisting of nine experiments, was developed. The workpiece is a cylinder, the size of which is chosen based on the actual process of forging, taking into account the scale of experiment. The diameter of the workpiece is 40 mm, and the length is 80 mm. As factors of influence, two parameters are chosen, namely the thickness of the deforming tool and the depth of its indentation. The thickness of the deforming tool is chosen in the range of 0.1-0.3 of the diameter of the workpiece, which is thinner than the forging dies used in the enterprise. The depth of indentation, which corresponds to the degree of deformation, is 30..70%. On the basis of the composite plan of the experiment, a physical modeling of the tool indentation process into a C1 grade lead was carried out. For this purpose, samples and a tool of the required sizes were made, and a research was carried out on the basis of the metal forming department laboratory. The form-modification of the samples obtained after deformation has been analyzed, and the dependences of changes in geometric parameters such as the effective diameter of the knee, the length of the contact area of the workpiece with the lower and upper deformation tools, and the maximum distribution of the metal in the zone of the formation of the crank pin, on the thickness of the deforming tool and the depth of its indentation into the workpiece have been constructed. The forging pattern reflects the fact that the selected intervals of the deformation parameters are correct, that is, with the thickness of the tool more than 0,3 to the diameter of the workpiece, there is a strong distortion of the forging, and in the thickness less than 0,1 to the diameter of the workpiece, there will be the possibility of instability and even destruction of the tool. At an indentation depth of less than 30%, such forging scheme is not effective, and over 70% there is a significant distortion of the workpiece. Thus, the dependence of the change in the value of the effective diameter of the knee on the given forging parameters in the

places of formation of the crank pin of the crankshaft was obtained. This allows to assign, with a certain thickness of the deforming tool, the level of compression to form the required diameter of the crank pin and the shaft cheek at the location of the knee.

Since further simulation and analysis of the forging process the crank pin will occur in the application QForm, for the analysis the accuracy of the computer model, a process simulation of thin die indentation into the workpiece has been carried out. According to the experiment plan, a computer model was constructed for nine experiments and a calculation was made. The obtained data are analyzed according to the same scheme and are compared with the results of physical modeling. The estimation of the discrepancy of data showed that the error is not more than 10%, which is a satisfactory result for this study, and thus, it is possible to continue the research using computer simulation for the process of forging the crankshaft's crank pin.

For the forging of the crank pin with "thin" dies, the same parameters of the process are used, however, at this stage there are multiple deflections, that is, when applying the developed scheme of deformation, which includes from two to four coggings with a rotation for 90° (the number of coggings depends on the degree of deformation when indenting the tool into the workpiece) to get a square crank cavity in the section, after which there are two cogings with a rotation for 45° and 90°, for receiving in the section of the crank pin the octagon, than followed small coggings with a rotation for 15° in order to become in the cross section of the crank pin the form of circle. The received diameter of the crank pin is 0,3..0,7 to the diameter of the workpiece. In this case, the form-change of the metal has been analyzed and the regularity of the change in the length of the crank neck from the investigated parameters of forging is determined. The use of computer simulation allowed us to estimate the stress-deformed state of forging and temperature distribution during the forging process. The temperature field in this case shows that in the place of the crank pin formation there is some slight decrease in temperature, but in the process of forging, the temperature of the surface of the billet is aligned, due to more hot internal layers of the metal. The assessment of the stressed state was carried out by analyzing the distribution of average stresses in the forging. This analysis has proved that the chosen scheme of crank pin forging is the most rational, on the basis of the fact that

when tool indentation, a slight distortion of the forging occurs due to the compressive stresses on the contact between the workpiece and the upper die, and in subsequent torsion, due to tensile stresses, the workpiece bends in the opposite direction and again becomes straightforward, and this straightness is preserved until the end of the forging process, due to the symmetry of the deforming force application. Also, an improved deformation unevenness method was used to analyze the distribution of deformations in the crankshaft's crank pin.

On the basis of the conducted researches results, the advanced technology of large crankshafts forgings production was developed. On the basis of the received regularities of metal shaping, recommendations on the application of a "thin" deforming tool were developed, and, using an improved method for determining the unevenness of deformation for a certain length of a crank pin, the number of coggings, rotation degrees and levels of deformation was determined. This allows to choose the variant of deformation (forging scheme) with minimal deformations unevenness of metal at the place of large crankshafts crank pin formation.

Key words: large crankshaft, crank pin, thin forging die, indentation, shaping, unevenness

Список публікацій:

1. Клемешов Е.С. Исследование формоизменения металла в процессе ковки шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ. - 2017. - №35. - С. 21-24.

2. Клемешов Є.С. Дослідження впливу параметрів кування на форму поковки колінчастого валу та впровадження розробок на ПрАТ «Дніпропрес Сталь» / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб, Є.І. Шифрін // Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА. - 2017. - №. 2 (45) - С. 54 - 63.

3. Клемешов Е.С. Анализ путей повышения качества поковок коленчатых валов с применением осадки-протяжки слитка / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА. - 2016. - №1 (42). - С. 84 - 91.

4. Чухліб В.Л. Дослідження напружено-деформованого стану при осадці сталей та сплавів / В.Л. Чухліб, Є.С. Клемешов // Металлургическая и промышленность. - 2015. - №5. - С. 34-40.

5. Чухлеб В.Л. Промышленное внедрение ресурсосберегающего процеса ковки с рациональным режимом формоизменения уменьшенной прибыльной части слитков из корозионностойких сталей / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, А.А. Фролов, Х. Дыя // Обработка материалов давлением. 2017. №1 (44). С. 123-130.

6. Чухлеб В.Л. Исследование ковки титановых сплавов на гидравлических прессах в условиях ООО «Днепропресс Сталь» / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дыя // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. Запоріжжя: ЗНТУ. - 2016. - №2. С. 18-22.

7. Чухлеб В.Л. Оптимизация технологии ковки поковок гладких валов из дуплекс-стали в условиях ООО «Днепропресс Сталь» / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дыя // Вестник НТУ «ХПИ». Харків: НТУ. - 2016. - №31. - С. 75 - 81.

8. Чухлеб В.Л. Исследование неравномерности распределения деформаций при протяжке заготовок из сплава ЭИ698 при переменных параметрах предварительной осадки / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, Х. Дыя // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. Collectiv monograph. – Czenstachowa, Polska. - 2016. - №56. - S. 232-238.

9. Клемешов Є.С. Дослідження формозміни заготовки при вдавлюванні вузького бойка / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 29 червня – 1 липня 2017 р. Матеріали конференції. – Київ, КПІ:2017. – С. 106 – 107.

10. Клемешов Е.С. Исследование формоизменения металла в процессе ковки шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // IX Международная научно-техническая конференция «Ресурсосбережение и

энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии», 22-24 листопада 2017 р. Матеріали конференції. – Харків, ХПІ:2017.

11. Клемешов Е.С. Анализ неравномерности распределения деформаций при ковке шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства», 25-26 квітня 2018 р. Матеріали конференції. – Кременчук, КрНУ:2018.

12. Клемешов Є.С. Дослідження видовження шатунної шийки при куванні тонкими бойками / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», 29 травня - 02 червня 2018 р. Матеріали конференції. – Залізний Порт.

13. Клемешов Є.С. Дослідження процесу кування опорних шийок та його впливу на форму коліна / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 19-22 червня 2018 р. Матеріали конференції. – Київ, НТУУ КПІ:2018.

ЗМІСТ

ВСТУП……..…..15

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ВИГОТОВЛЕННЯ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ З ПОПЕРЕДНІМ ОСАДЖУВАННЯМ ТА ПРОТЯГУВАННЯМ ЗЛИВКА.....22

1.1 Види кривошипних валів……22

1.2 Вимоги до якості поковок колінчастих валів. Механічні властивості заготовки і поковки……...24

1.3 Технології виготовлення колінчастих валів штампуванням і вільним куванням…….28

1.3.1 Виготовлення колінчастих валів штампуванням……30

1.3.2 Виготовлення колінчастих валів методом згинання і висаджування…....32

1.3.3 Виготовлення колінчастих валів вільним куванням……...35

1.4 Комп’ютерне моделювання процесів вільного кування……..40

1.5 Опис методики експериментального дослідження……..41

1.6 Висновки по розділу 1……45

2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНИ МЕТАЛУ ПРИ КУВАННЯ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ……...47

2.1 Вдосконалення методу оцінки нерівномірності деформацій в поковці……47

2.2 Початкові параметри та граничні умови……...……50

2.3 Дослідження формозміни заготовки за допомогою комп’ютерного моделювання при отриманні поковок колінчастих валів……..57

2.4 Аналіз результатів моделювання процесу кування поковок колінчастих валів……82

2.5 Висновки до розділу 2……97

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ ПРИ ФОРМУВАННІ КОЛІНА ВАЛУ ТОНКИМ ДЕФОРМУЮЧИМ ІНСТРУМЕНТОМ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ПОКОВОК КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ ВІЛЬНИМ КУВАННЯМ…….....99

3.1 Постановка задачі……99

3.2 Опис проведеного експерименту……104

3.3 Аналіз результатів проведеного експерименту……..113

3.4 Висновки до розділу 3……...120

4. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОКОВОК КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ З ОТРИМАННЯМ ШАТУННОЇ ШИЙКИ ВІЛЬНИМ КУВАННЯМ……121

4.1 Розробка технологічного процесу виготовлення поковок колінчастих валів……..…….……..121

4.2 Технологічна застосовуваність досліджених схем кування поковок колінчастих валів……..….127

4.3 Застосування тонкого деформуючого інструменту при $b_{інст}\backslash D_{заг}$ = 0,1..0,3 та $h_{вн}\backslash D_{заг}$ = 0,3..0,7……...129

4.4 Технологічні рекомендації по застосуванню тонкого деформуючого інструменту при виготовленні поковок колінчастих валів……...132

4.5 Висновки до розділу 4……...137

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ……...140

ЛІТЕРАТУРА……...143

ДОДАТКИ……152

Додаток А……153

ВСТУП

Актуальність теми. До великогабаритних важких поковок, в тому числі і колінчастих валів, які виготовляють вільним куванням, відносять вироби масою більше 1…2 тонн. В якості матеріалу поковки колінчастого валу зазвичай використовують леговані марки сталей, які забезпечують високі показники міцності, витривалості матеріалу при знакозмінному навантаженні та жаростійкість. При куванні великогабаритних колінчастих валів зазвичай використовують технологічний напуск для спрощення форми поковки до типового гладкого валу з подальшим видаленням напуску механічною обробкою для отримання шатунної шийки.

Основною операцією кування при виготовленні поковок колінчастих валів є протягування (ковальська витяжка). Відомі основні підходи до виконання цієї операції при використанні стандартизованого за розмірами деформуючого інструменту, яким, однак, неможливо наблизити форму коліна валу в поковці до форми готового виробу. Рекомендована товщина бойка гідравлічного пресу, на якому здійснюється кування заготовки зі зливка масою 6,5 т, по відношенню до діаметра заготовки ($D_{заг}$) може складати від 0,5 і більше. Для отримання шатунної шийки колінчастого валу вільним куванням необхідно застосовувати бойки з товщиною менше 0,5 від діаметра заготовки, які до даного часу на підприємствах не використовувалися. Це зумовлено, зокрема, обмеженим знанням щодо закономірностей впливу такого деформуючого інструменту з товщиною, наприклад, 0,1..0,3 від діаметра заготовки («тонкий бойок», «тонкий інструмент»), а також відносного ступеню деформації на формозміну шатунної шийки та щок колінчатого валу. Товщина бойка та відносний ступінь деформації обмежені великим видовженням шатунної шийки та можливим вигином заготовки, що також може призводити до заклинювання бойка металом.

Відомий підхід до визначення раціональних параметрів кування при застосуванні метода оцінки об’ємної нерівномірності деформації (за Чухлібом В.Л.). Чухлібом В.Л.). Даний метод базується на визначенні коефіцієнта нерівномірності деформації в поперечних перерізах поковки, однак не враховує різниці між середнім значенням коефіцієнта нерівномірності по перерізу та значенням цього параметру у певних точках перерізу. Це перешкоджає адекватній оцінці нерівномірності деформації по перерізах та узгодженню рівню нерівномірності деформації з її кількісним вираженням.

Зазначені обставини не дозволяють визначити раціональні параметри кування при використанні «тонкого» деформуючого інструменту для отримання шатунної шийки колінчастого валу, а це веде до додаткових витрат металу на етапі механічної обробки при видаленні ковальського напуску з шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів.

Зважаючи на це, робота яка спрямована на визначення закономірностей формозміни металу при куванні шатунної шийки колінчастого валу при співвідношенні товщини інструменту та діаметра заготовки в інтервалі менше 0,5, а також визначення умов максимального наближення форми та розмірів поковки до готового виробу для зменшення витрат металу при виготовленні великогабаритних колінчастих валів, актуальна.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Виконана дисертаційна робота відповідає напрямку наукових досліджень кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Національної металургійної академії України (НМетАУ). Дослідження виконані в рамках програми та відповідної тематики держбюджетних науково-дослідних робіт кафедри обробки металів тиском НМетАУ: ДР №0116U002657, ДР № 0115U003169, а також госпдоговірної науково-дослідної роботи з ПрАТ «Дніпропрес Сталь» (ДР №0117U005159). Автор був виконавцем цих робіт.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є дослідження закономірностей формозміни металу при куванні шатунної шийки колінчастого валу при співвідношенні товщини інструменту та діаметра заготовки в інтервалі 0,1..0,3, а

також визначенні умов максимального наближення форми та розмірів поковки до готового виробу для зменшення витрат металу при виготовленні великогабаритних колінчастих валів.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі:

1) виконати аналіз відомих результатів досліджень в галузі виготовлення поковок колінчастих валів, зокрема, визначити особливості процесу кування, що обумовлюють шляхи зменшення витрат металу;

2) вдосконалити метод визначення нерівномірності деформації для адекватної оцінки величини нерівномірності та призначення раціональних режимів деформування при куванні шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів;

3) теоретично дослідити закономірності зміни геометричних параметрів заготовки при вдавлюванні бойка в залежності від товщини інструменту в діапазоні 0,1..0,3 від діаметра заготовки та відносному ступені деформації в інтервалі 30..70%;

4) експериментально дослідити та перевірити теоретично отримані закономірності формозміни металу при куванні шатунної шийки великогабаритного колінчастого валу у вказаних інтервалах параметрів;

5) теоретично дослідити формозміну металу при куванні шатунної шийки великогабаритного колінчастого валу тонкими бойками в залежності від кількості обтиснень, кутів кантувань та ступеню обтиснення, а також дослідити нерівномірність розподілення деформацій в металі;

6) розробити рекомендації щодо удосконалення процесу кування поковок великогабаритних колінчастих валів, з урахуванням нерівномірності деформацій, при використанні раціональної кількості обтиснень, кутів кантувань та ступеню обтиснень для отримання поковок за формою наближених до готового виробу;

7) використати отримані результати у виробничих умовах та навчальному процесі.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес виготовлення великогабаритних поковок колінчастих валів вільним куванням.

Предмет дослідження. Закономірності формозміни металу при використанні тонкого деформуючого інструменту в процесі кування великогабаритних поковок колінчастих валів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження напружено-деформованого стану заготовки проводилися з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Перевірка достовірності отриманих теоретичних результатів здійснювалася експериментальними дослідженнями в лабораторних умовах на основі принципів моделювання процесів гарячої пластичної формозміни металів. Обробка результатів досліджень проводилася з використанням удосконаленого методу визначення показника нерівномірності деформацій.

Наукова новизна. Наукову новизну мають перелічені нижче результати теоретичних і експериментальних досліджень, які вперше отримані в дисертації.

1. Одержав розвиток метод прогнозування об'ємної нерівномірності деформації металу в процесах вільного кування для визначення раціональних режимів деформування при отриманні шатунної шийки великогабаритного колінчастого валу.

Розробка відрізняється урахуванням різниці між середнім значенням коефіцієнту нерівномірності по перерізу поковки та значеннями цього параметру у певних точках перерізу. Це дозволяє узгодити рівень оцінюваної нерівномірності деформації по перерізам з її кількісним вираженням, а також адекватно оцінювати величину нерівномірності та визначати раціональні режими деформування при куванні.

2. Вперше теоретично визначено та експериментально перевірено залежність зміни величини ефективного діаметра коліна валу від товщини деформуючого інструменту (в інтервалі 0,1..0,3 до діаметру заготовки) та ступеню одиничного обтиснення (в інтервалі 30..70%) при вільному куванні місць формування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів.

Раніше такі дані для вказаних діапазонів були невідомі. Це дозволяє призначати, при певній товщині деформуючого інструменту, діаметр заготовки та рівень обтиснення для формування необхідного діаметра шатунної шийки та щок валу в місці розташування коліна великогабаритного колінчастого валу.

3. Вперше при використанні деформуючого інструменту з відношенням товщини до діаметра заготовки в інтервалі 0,1..0,3 при багаторазових обтисненнях теоретично з використанням вдосконаленого методу визначення нерівномірності деформації металу для певної довжини шатунної шийки визначено кількість обтиснень, рівнів ступеню деформації та кути кантувань.

Раніше такі дані для вказаних діапазонів були невідомі. Це дозволяє обрати варіант схеми деформування із забезпеченням мінімальної нерівномірності деформацій в місці формування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів.

Практичне значення отриманих результатів. Дослідження процесу кування з використанням тонкого деформуючого інструменту при виготовленні поковок колінчастих валів дозволило:

- визначити геометричні параметри заготовки та ступінь обтиснення при використанні «тонких» бойків для формування необхідного діаметра шатунної шийки та щок валу в місці розташування коліна великогабаритного колінчастого валу;

- обґрунтувати раціональну кількість обтиснень, кути кантувань та ступінь обтиснення при куванні шатунної шийки великогабаритних поковок колінчастих валів;

- розробити технологічні рекомендації, які дозволяють при виробництві поковок великогабаритних колінчастих валів із використанням бойків з товщиною в інтервалі 0,1..0,3 від діаметра заготовки, зменшити витрати металу за рахунок мінімізації ковальського напуску;

- розробити та впровадити рекомендації у виробництво в ковальсько-термічному цеху ПрАТ «Дніпропрес Сталь» для виготовлення поковок колінчастих валів із злитків та заготовок масою більше 2 тон при використанні тонких бойків

(акт від 22.01.2018 р.).

- використовувати в навчальному процесі результати, отримані в ході виконання дисертаційної роботи, на кафедрі обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова при викладанні дисциплін «Конструкції та розрахунки машин та механізмів обробки тиском», «Моделювання та оптимізація процесів обробки металів тиском» і «Теоретичні та експериментальні дослідження процесів обробки металів» для бакалаврів спеціальності 6.050401 – металургія та магістрів спеціальності 8.136 – механічна інженерія, а також при виконанні студентами курсових проектів і випускних кваліфікаційних робіт. (довідка від 21.05.2018 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати досліджень отримані і узагальнені автором самостійно. При проведенні науково-дослідних робіт, результати яких опубліковані в співавторстві, автором виконані теоретичні дослідження, проведений аналіз результатів, сформульовані висновки і розроблені рекомендації щодо вдосконалення кування поковок. Автор брав участь у плануванні і проведенні експериментальних досліджень, обробці та аналізі отриманих результатів, а також у впровадженні результатів роботи у виробництво та навчальний процес. Особистий внесок у спільних публікаціях (згідно з переліком опублікованих робіт): [1] комп’ютерне моделювання та аналіз отриманих даних, розробка раціональних параметрів кування; [2] обґрунтування раціональних параметрів кування та впровадження розробок у виробництво; [3] узагальнення та аналіз існуючих схем кування поковок колінчастих валів; [4] аналіз нерівномірності розподілення деформацій при осаджуванні заготовок; [5] аналіз шляхів зменшення витрат металу при куванні зливків із легованих сталей; [6] аналіз даних та оцінка можливості використання методу оцінки нерівномірності деформацій у виробничих умовах; [7] систематизація літературних даних та аналіз даних комп’ютерного моделювання; [8] аналіз формозміни заготовок при різних параметрах осаджування та аналіз нерівномірності розподілення деформацій; [9] аналіз формозміни заготовки при теоретичному та експериментальному дослідженні; [10] планування, проведення та аналіз результатів математичного моделювання процесу отримання шатунної шийки колінчастого валу; [11] аналіз нерівномірності деформацій в

шатунній шийці поковки колінчастого валу; [12] аналіз та узагальнення висновків за проведеним дослідженням; [13] проведення теоретичного дослідження та аналіз отриманих даних.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались та обговорювались на Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» (м. Кременчук, 9-11 листопада 2016 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Досягнення та проблеми розвитку технологій та машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 26-28 квітня 2016 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Титан 2016: Виробництво та використання в авіабудуванні» (м. Запоріжжя, 3-4 листопада 2016 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 29 червня – 1 липня 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Пластична деформація металів» (м. Дніпро, 22-26 травня 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (м. Харків, 22-24 листопада 2017 р.), Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» (м. Кременчук, 25-26 квітня 2018 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (м. Залізний Порт, 29 травня - 02 червня 2018 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 19-22 червня 2018 р), Придніпровському науковому семінарі «Обробка металів тиском» Національної металургійної академії України (м. Дніпро, 2015 – 2018 р.р.).

Публікації. Основні матеріали дисертації викладені в 13 публікаціях, включаючи 7 статей, що входять до переліку наукових фахових видань, затвердженого МОН України, 1 закордонне видання та 5 тез доповідей до участі у конференціях.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів і висновків, викладена на 154 сторінках; містить: таблиць - 13; рисунків - 97, список використаних джерел з 85 найменувань.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ВИРОБНИЦТВА КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ З ПОПЕРЕДНІМ ОСАДЖУВАННЯМ-ПРОТЯГКВАННЯМ ЗЛИВКА

1.1 Види кривошипних валів

Колінчастий вал відноситься до групи кривошипних валів, та є найбільш трудомістким у виробництві, у порівнянні з іншими деталями, так як при виготовленні необхідно забезпечити не лише дуже високу точність геометричних розмірів, але і також високі показники механічних властивостей. На рисунку 1.1 представлено різновиди кривошипних валів: кривошипний (рис. 1.1, а), колінчастий (рис. 1.1, б) та ексцентриковий (рис 1.1, в) [1].

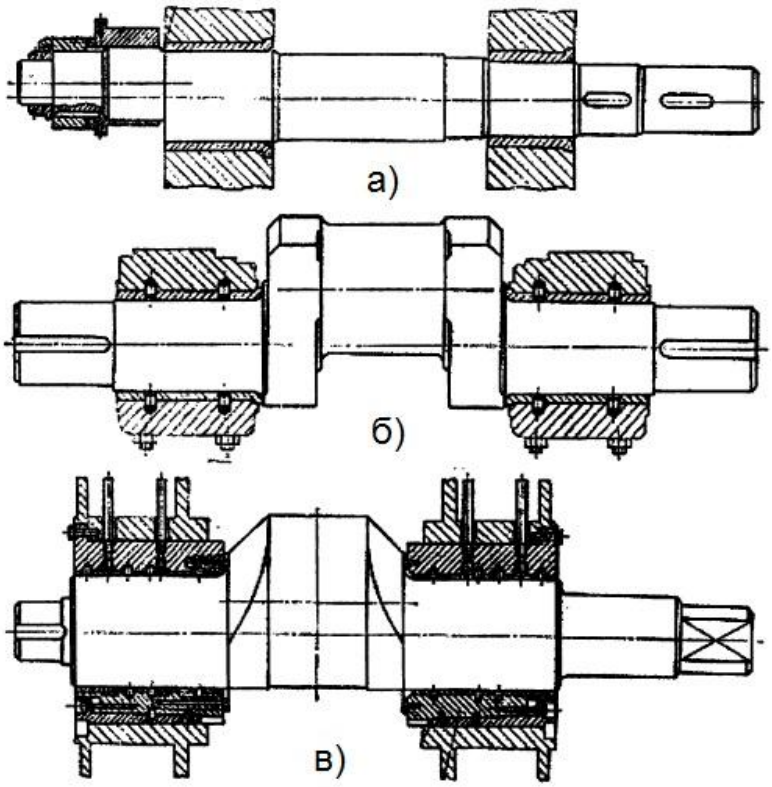


Рисунок 1.1 – Різновиди кривошипних валів

Колінчастий вал є валом, деякі частини якого зміщені на певну відстань від головної осі вала. Ця відстань називається «ексцентриситет» (рис. 1.2, г).

Зміщення шатунної шийки колінчастого вала (рис. 1.2, в), поєднаної з опорними шийками (рис. 1.2, б) за допомогою щік (рис. 1.2, а), набагато більше ніж у ексцентрикового валу, при цьому діаметр і довжина шатунної шийки незначно відрізняється від аналогічних розмірів опорних шийок вала. На рисунку 1.2 представлене зображення складових частин коліна вала.

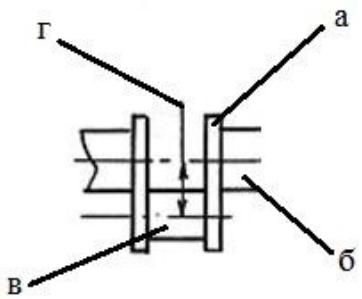


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення колінчастого вала

Мається на увазі, що поява ексцентриситету дозволяє не просто передавати крутний момент, а перетворювати обертовий момент в зворотно-поступальний рух і назад (мал. 1.3). Для цього на зміщений обсяг валу, званий «шатунної шийкою» або «мотильовою шийкою» (рис. 1.3, а), поміщається шатун (рис. 1.3, б) і повзун (рис. 1.3, в), який рухається по направляючим (мал. 1.3, г). Хід повзуна при цьому дорівнює відстані від головної осі вала до осі шатунної (мотильової) шийки.

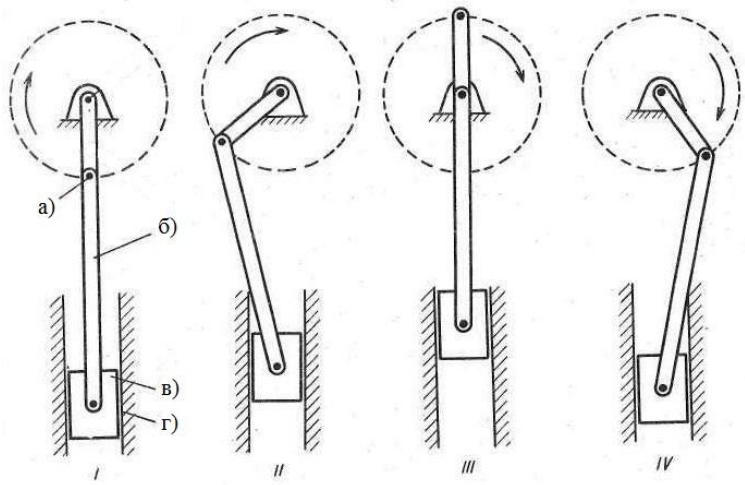


Рисунок 1.3 – Схема перетворення крутного моменту в зворотно-поступальний рух

Конструкція колінчастого валу і його габаритні розміри залежать від наступних основних факторів:

1) Величини переміщення повзуна, провідною ланкою якого є колінчастий вал;

2) Розташування кривошипного механізму щодо опорних стінок станини;

3) Зусилля і крутний момент, які передаються колінчастим валом;

4) Швидкості обертання.

1.2 Вимоги до якості поковок колінчастих валів. Механічні властивості заготовки і поковки

Колінчастий вал є тяжко навантаженою деталлю машини, працюючої в умовах знакозмінних, динамічних навантажень, а також в умовах високої температури та агресивних середовищ. У зв'язку з такими умовами праці колінчастий вал повинен мати високі механічні та спеціальні фізичні властивості, тобто мати високу якість. Якість же визначається замовником продукції і повинна гарантуватися виробником. Якісність виготовленої продукції виробник перевіряє за допомогою спеціальних стандартів, які нормують набір механічних властивостей деталі. Так, для перевірки механічних властивостей колінчастих валів використовуються такі вітчизняні та зарубіжні стандарти як: ГОСТ 10158-76 «Дизелі та двигуни газові. Вали колінчасті стальні» [2]; ГОСТ 8479-70 «Поковки з конструкційної вуглецевої і легованої сталі» [3]; ASTM A456/A456M – 99 «Magnetic Particle Examination of Large Crankshaft Forgings» [4]; ASTM A503/A503M - 01 «Ultrasonic Examination of Forged Crankshafts» [5]; ASTM A983/A983M - 04 «Continuous Grain Flow Forged Carbon and Alloy Steel Crankshafts for Medium Speed Diesel Engines» [6]. За цими стандартами нормується ряд таких механічних властивостей, як межа текучості $\sigma_{\text{т}}$, супротив розриву $\sigma_{\text{в}}$, відносне подовження δ_5, відносне звуження ψ, ударна в'язкість $a_{\text{н}}$ та твердість НВ

(наприклад в стандарті ASTM A983/A983M – 04 на виготовлення крупних колінчастих валів для дизельних двигунів середньої швидкості).

Такі стандарти як ASTM A456 та ASTM A503 сертифікують проведення контролю якості поковок колінчастих валів неруйнівними методами дослідження. Так в стандарті ASTM A456 визначено основні рекомендації та положення щодо проведення магнітного методу перевірки колінчастих валів на зовнішні дефекти, такі як тріщини, флокени або закови. Стандарт ASTM A503 визначає критерії браку деталей при ультразвуковому методі контролю якості поковок. Так на рисунку 1.4 представлено 3 зони прийняття показників ультразвукового контролю. Також на рисунку 1.5 представлено напрямки сканування при ультразвуковому контролі.

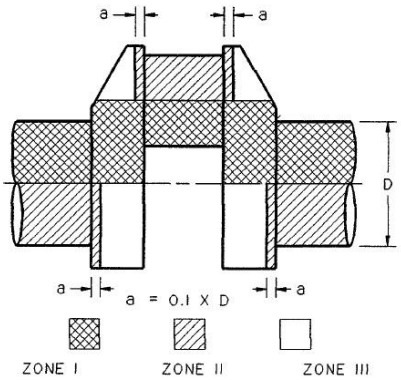


Рисунок 1.4 – Зони ультразвукового контролю колінчастих валів

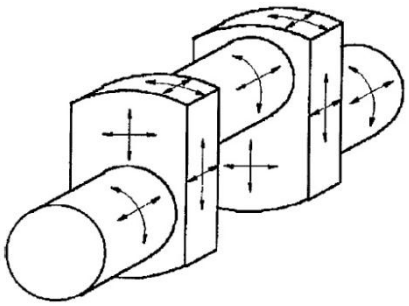


Рисунок 1.5 – Напрямки сканування при ультразвуковому контролі поковки колінчастого валу

В таблиці 1.1 та 1.2 представлені нормативні показники механічних властивостей по ГОСТ 10158-76 для колінчастих валів в залежності від марки сталі, діаметру корінної шийки та категорії міцності.

Таблиця 1.1 – Механічні властивості поковок

Найменування показників механічних властивостей	Норми для валів з вуглецевої сталі марок							
	35			40			45	
	при діаметрі шатунної шийки							
	до 100 мм	від 100 до 300 мм	від 300 мм	до 100 мм	від 100 до 300 мм	від 300 мм	до 100 мм	від 100 до 300 мм
Межа міцності $\sigma_т$, МПа, не менше	274	264	255	314	294	294	343	323
Тимчасовий супротив розриву $\sigma_в$, МПа, не менше	510	490	490	568	568	548	618	618
Відносне подовження δ_5, %, не менше	20	18	18	18	17	17	18	17
Відносне звуження ψ, %, не менше	42	38	38	40	36	32	38	35
Ударна в'язкість, кДж/м^2, не менше	588	588	490	588	490	392	540	490
Твердість, НВ, не менше	146	140	140	156	146	146	163	156

Таблиця 1.2 – Нормування механічних властивостей в залежності від категорії міцності

Найменування показників механічних властивостей	Норми для легованої сталі категорії міцності (КП)			
	КП-40	КП-50	КП-60	КП-80
Межа міцності $\sigma_т$, МПа, не менше	392	490	588	785
Тимчасовий супротив розриву $\sigma_в$, МПа, не менше	637	686	785	932
Відносне подовження δ_5, %, не менше	15	13	13	10
Відносне звуження ψ, %, не менше	45	45	45	40
Ударна в'язкість, кДж/м^2, не менше	588	588	588	490
Твердість, НВ, не менше	187..255	197..255	229..285	269..375

Ще одним стандартом, що визначає рівень механічних властивостей, є ГОСТ 8479-70 «Поковки з конструкційної вуглецевої і легованої сталі». Даний стандарт поширюється на поковки загального призначення діаметром (товщиною) до 800 мм з конструкційної вуглецевої, низьколегованої і легованої сталі, виготовлені куванням і гарячим штампуванням. До даного стандарту також відносяться і поковки колінчастих валів.

У відповідності з ГОСТ 8479-70, по механічним властивостям, поковки, що поставляються після остаточної термічної обробки, поділяються на категорії міцності. Категорії міцності, відповідні їм норми механічних властивостей, які визначаються при випробуванні на поздовжніх зразках, і норми твердості наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Категорії міцності поковок

Категорія міцності	Межа міцності, $\sigma_{0,2}$	Тимчасовий супротив, $\sigma_в$	Відносне подовженя δ_5, %				відносне звуження ψ, %				Ударна в'язкість KCU, Дж/мм^2				Твердість по Брінелю
			Діаметр (товщина) поковки у перерізі												
	МПа (кгс/мм^2)		До 100	від 100 до 300	від 300 до 500	від 500 до 800	До 100	від 100 до 300	від 300 до 500	від 500 до 800	До 100	від 100 до 300	від 300 до 500	від 500 до 800	
КП175	175	355	28	24	22	20	55	50	45	40	64	59	54	49	101-143
КП195	195	390	26	23	20	I8	55	50	45	3S	59	54	49	44	111-154
КП215	215	430	24	20	IS	16	53	48	40	35	54	49	44	39	123-167
КП245	245	470	22	19	17	15	48	42	35	30	49	39	34	34	143-179
КП275	275	530	20	17	15	13	40	38	32	30	44	34	29	29	156-197
КП315	315	570	17	14	12	11	38	35	30	30	39	34	29	29	167-207
КП345	345	590	18	17	14	12	45	40	38	33	59	54	49	39	174-217
КП395	395	615	17	15	13	11	45	40	35	30	59	54	49	39	187-229
КП440	440	635	16	14	13	11	45	40	35	30	59	54	49	39	197-235
КП490	490	655	16	13	12	11	45	40	35	30	59	54	49	39	212-248
КП540	540	685	15	13	12	10	45	40	35	30	59	54	49	39	223-262
КП590	590	735	14	13	12	10	45	40	35	30	59	54	49	39	235-277
КП640	640	785	13	12	11	10	42	38	33	30	59	54	49	39	248-293
КП685	685	835	13	12	11	10	42	38	33	30	59	54	49	39	262-311
КП735	735	880	13	12	11	-	40	35	30	-	59	54	49	-	277-321
КП785	785	930	12	11	10	-	40	35	30	-	59	54	49	-	293-331

Норми твердості для поковок II і III груп і категорії міцності для поковок IV і V груп встановлюються за угодою виготовлювача зі споживачем. Марка сталі встановлюється за угодою виготовлювача з споживачем і вказується на кресленні деталі і поковки.

На вимогу споживача тимчасовий опір повинен бути вище зазначеної, для заданої категорії міцності, не більше:

- 120 МПа (12 кгс/мм^2) при необхідному $\sigma_в$ менше 600 МПа (60 кгс/мм^2);
- 150 МПа (15 кгс/мм^2) при необхідному $\sigma_в$ 600-900 МПа (60-90 кгс/мм^2);
- 200 МПа (20 кгс/мм^2) при необхідному $\sigma_в$ понад 900 МПа (90 кгс/мм^2).

У зв'язку з вищесказаним, виникає зв'язок між маркою сталі, необхідними механічними властивостями та категорією міцності за стандартом, і таким чином,

саме на вимогу замовника, визначається категорія міцності. Співставлення деяких марок сталей до певних категорій міцності представлено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Сталі відповідні певним категоріям міцності

Категорії міцності	Діаметр (товщина) поковок, мм			
	До 100	От 100 до 300	От 300 до 500	От 500 до 800
КП175 (18)	15, 20, 25, Ст3	Ст3, 15, 20, 25, Ст5	20, 25, 30, Ст5	20, Ст5, 30, 35
КП195 (20)	Ст3, Ст3ГСП, 15, 20, 25, 15Х, 20Х, 15ХМ	Ст3, Ст15ХМ, 20, 25, 30, Ст5, 15Х, 20Х, 12Х1МФ	Ст5, 25, 30, 35, 20Х, 22К	Ст5, 30, 35, 22К
КП215 (22)	20, 25, 10Г2, 20Х, 15ХМ, 12Х1МФ	20, 25, Ст5, 30, 35, 20Х, 15ХМ, 10Г2, 22К, 16ГС, 12Х1МФ	30, 35, 40, 10Г2, 22К, 12Х1МФ	30, 35, 40, 22К, 1ХГ2, 12Х1МФ
КП245 (25)	25, 30, 35, Ст5, 20Х, 12ХМ, 15ХМ, 20ГС	20, 30, 35, 40, 45, 20Х, 12ХМ, 15ХМ, 16ГС, 20ГС, 12Х1МФ	30, 35, 40, 45, 40, 25ГС, 35ХМ, 12Х1МФ	45, 25ГС, 40Х, 35ХМ
КП275 (28)	35, 40, 45, 20Х, 25ГС, 15ХМ	25, 35, 40, 45, 50, 20Х, 25ГС,12ХМ, 15ХМ, 35Г2, 35ХМ, 34ХМ (34ХМА)	40, 45, 40Х, 25ГС, 15ХМ, 35ХМ, 34ХМ (34ХМА)	40, 40Х, 25ГСА, 15Х1М1Ф
КП315 (32)	35, 45, 50, 40Х, 45Х, 15ХМ, 50Г2, 35ХМ, 34ХМ (34ХМА)	40, 45, 40Х, 55, 50Г2, 35ХМ, 40ХН, 20Х, 34ХМ (34ХМА)	45, 45Х, 40Х, 40ХН, 38ХГН, 34ХН1М	40Х, 45Х, 45Х, 40ХН, 38ГН
КП345 (35)	40, 45, 15Х, 40Х, 50Г2, 45Х, 50Х, 15ХМ, 35ХМ, 38ХГН	45, 15ХМ, 20Х, 40Х, 45Х, 50Х, 50Г2	40Х, 45Х, 40ХН, 50Х, 38ХГН	45Х, 50Х, 38ХГН, 35ХМ, 15Х1М1Ф, 34ХМ (34ХМА)

Основним матеріалом при виготовленні великогабаритних колінчастих валів слугують леговані марки сталі, які забезпечують хороші показники міцності, витривалості матеріалу при знакозмінному навантаженні та жаростійкість. До таких марок сталей відносять: 45Г2, 50Г, 18ХНМА, 18ХНВА, 40ХН2МА [7].

1.3 Технології виготовлення колінчастих валів штампуванням і вільним куванням

Спосіб виготовлення поковки колінчастого валу визначається її формою (типом), розмірами, масою та серійністю. За своїм розміром колінчасті вали можуть можуть бути від декількох десятків сантиметрів до десятків метрів та мати від одного до двох десятків колін. В залежності від цих факторів поковка колінчастого валу може бути отримана штампуванням або куванням на пресі або молоті [8].

Виготовлення поковки великогабаритного колінчастого валу починається з розробки креслення, яке складається на основі конструкторського креслення деталі. Розміри готової деталі збільшуються на величину припуску на механічну обробку та допуску на точність виготовлення при куванні. У деяких випадках, а саме у випадку виготовлення колінчастого валу вільним куванням, форму поковки спрощують, тобто призначають напуск на коліно валу (рис. 1.6) [9].

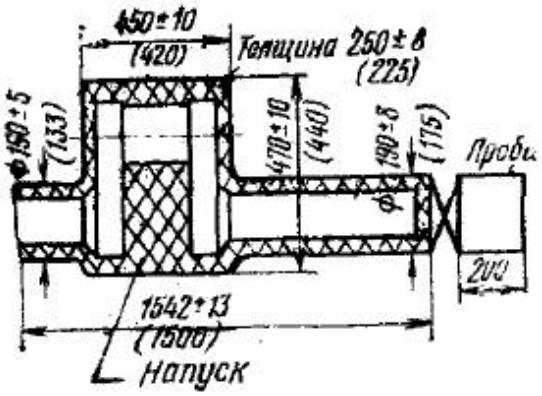


Рисунок 1.6 – Ескіз поковки колінчастого валу з напуском

На даний час не існує спеціалізованих технічних стандартів які б визначали величину припусків, допусків та напусків на поковки колінчастих валів, які виготовляються вільним куванням, тому на даний час використовуються правила призначення припусків, допусків на напусків, які зазначені у стандартах: ГОСТ 7062-90 «Поковки з вуглецевої та легованої сталі, які виготовляються куванням на пресах» [10]; ГОСТ 7829-70 «Поковки з вуглецевої та легованої сталі, які виготовляються куванням на молотах» [11], при цьому припуски та допуски призначаються як для гладких валів, а для поковок які виготовляються штампуванням припуски та допуски призначаються по ГОСТ 7505-89 [12].

Практично у всіх колінчастих валів, які виготовляють вільним куванням, довжина шатунної шийки менша за зазначені в ГОСТ 7062-90 величин виїмок. Мінімальна величина виїмки залежить від застосовуваного інструменту, який теж має стандартизовані розміри, а мінімальна товщина бойка не відповідає можливості виконання шатунної шийки вільним куванням.

1.3.1 Виготовлення колінчастих валів штампуванням

Невеликі колінчасті вали, які застосовують у двигунах внутрішнього згоряння мотоциклів, газонокосарок, автомобілів та деяких вантажних машин, виготовляються штампуванням, тому що поковки цих валів мають невелику масу та розміри, а отже розмір штампів може бути малим, а деформацію металу можна здійснювати на малопотужних пресах або молотах.

Колінчасті вали автомобільних та тракторних двигунів зазвичай мають від двох до восьми опорних шийок та до восьми шатунних шийок. Двохопорні колінчасті вали частіше усього застосовуються в двигунах мотоциклів, компресорів та інших невеликих агрегатах. Колінчасті вали, із кількістю опорних шийок від трьох до п’яти, застосовують в двигунах автомобілів та тракторів. Семи опорні колінчасті вали та вали з більшою кількістю опор ставлять на двигуни крупних легкових або вантажних автомобілів та важких тракторів.

Колінчасті вали виготовляють з противагами або без них. Кривошипи колінчастих валів розташовуються під кутом 180° або 120° та рідше під кутом 90°. Задній кінець колінчастого валу виконують з фланцем або без нього. Між фланцем та задньою шийкою колінчастого валу розташовують масло згінні канавки [13]. Такі поковки колінчастих валів відносяться до невеликих поковок з масою не більше 250 кг. Це обмеження викликано можливостями доступного обладнання (гідравлічних пресів або молотів), яке мається на підприємстві.

Штампування колінчастих валів з розгорнутими відносно один одного шатунними шийками може бути здійснена без використання і з використанням

викрутних пресів. У першому випадку значно ускладнюється конструкція штампів, які мають складну ламану поверхню роз'єму і збільшену глибину гравюр. Це призводить до збільшення відходів металу в облой і зниження стійкості інструменту. Використання викрутних пресів дозволяє здійснити формоутворення поковки з розташуванням всіх шатунних і корінних шийок в одній площині, а потім, після обрізки облою, зробити розворот шатунних шийок на заданий кут [14]. На рисунку 1.7 зображено загальний вигляд штампів для штампування поковок колінчастих валів.

Для традиційної технології штампування поковок колінчастих валів автомобілів [15] заготовкою слугує квадратний або круглий пруток, отриманий прокаткою або попередньо прокований для збільшення укову. Заготовку також підготовляють на кувальних вальцях, забезпечуючи таким чином більш високу точність її кінцевої формозміни в штампі на пресі [16]. Далі заготовка проходить заготівельно-формувальний перехід, попереднє штампування, остаточне штампування напівфабрикату в штампі з гравюрами, виконаними в поперечних перерізах за номінальним розмірами, обрізку облою.

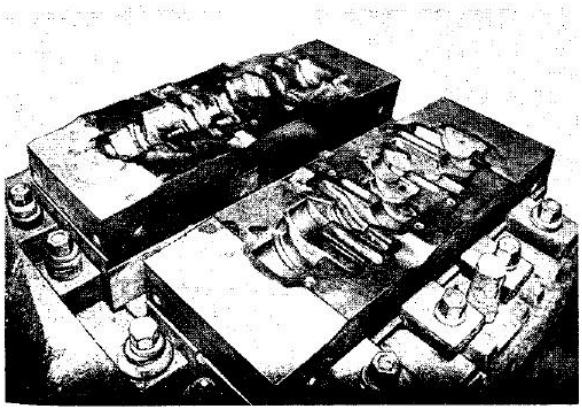


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд штампів для штампування поковок колінчастих валів

При виготовленні колінчатих валів більшої маси і габаритних розмірів, які застосовуються в потужних дизельних двигунах, також застосовується так зване «секційне штампування». Цей метод полягає в поєднанні вільного кування і

штампування заготовки по частинах. Секційний метод гарячого штампування дозволяє значно збільшити продуктивність, що забезпечує отримання високої точності розмірів поковок, виключає подальшу механічну обробку поковки або зводить її до мінімуму [17].

Суть цього методу полягає в тому, що спершу з нагрітого зливка (або прокату) виготовляють попередню заготовку, яку після другого нагрівання штампують в заготівельному штампі. При цьому заготовка одержує необхідну форму з набором металу в місцях, призначених для формування колін. Потім, після третього нагріву, вона встановлюється в підкладний трисекційний штамп. Потім піднімаючи траверсу преса і встановивши спеціальну підкладку, здійснюють деформацію середньої секції (рис. 1.8, а), після цого правої (рис. 1.8, б), а потім лівої секції (рис. 1.8, в). Після цього підкладка прибирається і проводиться калібрування валу усіма трьома секціями одночасно (рис. 1.8, г) [18].

На рисунку 1.8 наведені переходи штампування колінчастого валу в трьохсекційному штампі на гідравлічному пресі силою 100МН.

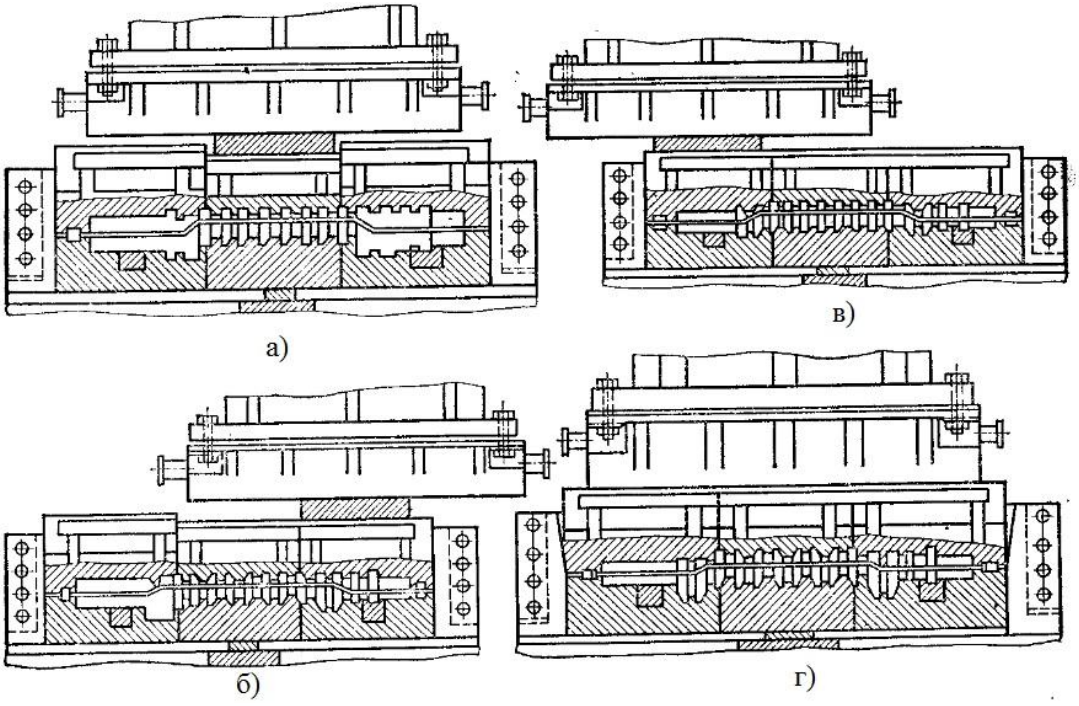


Рисунок 1.8 – Переходи штампування колінчастого валу в трьохсекційному штампі.

1.3.2 Виготовлення колінчастих валів методом згинання та висаджування

Спосіб кування колінчатих валів методом згинання і висаджування окремих його частин, об'єднані в одному процесі деформації, є досить добре дослідженим, а так само відомим і вживаним на підприємствах по всьому світу. Досить багато наукових робіт присвячено вивченню формоутворення коліна в процесі деформування, а також удосконалення деформуючого інструменту. Цей метод носить назву RR методу, або TR методу [19-28].

Суть даного методу полягає в тому, що попередньо сформовану і обточену заготовку нагрівають, а потім поміщають одну її частину, об’єм якої розраховано під формовку одного коліна, у спеціальний інструмент. Після чого відбувається процес формування, зображений на рисунку 1.9. Після того, як буде отримано одне коліно, заготовку переміщують уздовж осі для виготовлення другого коліна і одночасно розвертають її навколо осі на кут розвороту колін. Дану послідовність операцій повторюють до тих пір, поки поковка колінчастого валу не буде готова. Фланець колінчастого валу при цьому виготовляють тільки висаджуванням, прибираючи частину деформуючого інструменту.

У поковках виготовлених за даним методом, волокна макроструктури повторюють конфігурацію колінчастого валу, і подальша механічна обробка не призводить до перерізання волокон, що підвищує втомну міцність матеріалу на 20-25%.

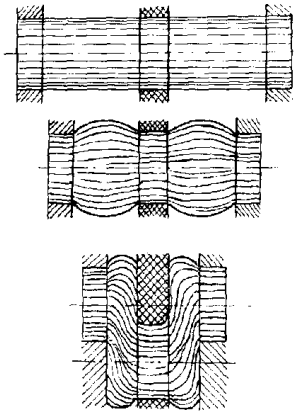


Рисунок 1.9 – Процес формозміни заготовки по TR методом.

Відзнаками даного методу від методу звичайної штампування колінчатих валів в штампах, є наступні пункти:

- значно більша можлива маса поковки (поковки масою до 2-7 тонн), порівняно зі звичайними методами штампування в штампах;

- можливість отримання колін з різними кутами розвороту один щодо одного, що дозволяє усунути операції викрутки колін на спеціальному обладнанні;

- волокна металу розташовані найбільш сприятливо, тобто за формою коліна, що виключає їх перерізання при механічній обробці.

На рисунку 1.10 представлена схема конструкції деформуючого інструменту при використанні TR методу при куванні колінчастих валів.

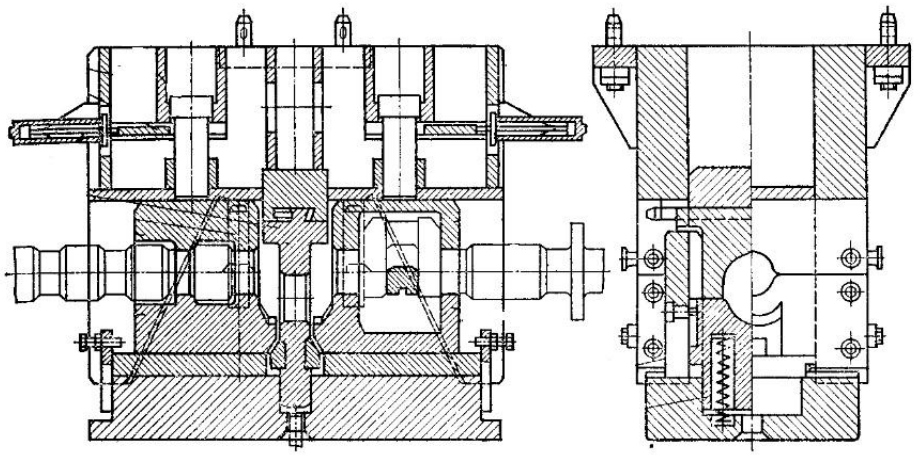


Рисунок 1.10 – Схема конструкції деформуючого інструменту.

На рисунку 1.11 зображено розташування волокон металу в коліні валу, виготовленого за TR методом.

Таким чином, після закінчення деформації, отримують поковку колінчастого валу, форма якої зображена на рис. 1.12 [29].

Як бачимо, за допомогою даного методу можливе отримання поковок колінчастих валів з одним або кількома колінами, при чому ці коліна можуть бути розгорнуті на необхідний кут.

Так само варто зауважити, що форма поковки вже практично наближена до форми готового колінчастого валу, що значно мінімізує обробку різанням, що в свою чергу підвищує коефіцієнт використання металу.

Крім вищеописаних достоїнств, також варто звернути увагу на недоліки цього методу. До недоліків методу відносяться:

- велика вартість виготовлення спеціального обладнання і деформуючого інструменту;

- можливість виготовлення колінчастих валів лише певних типорозмірів;

- необхідність наявності складського ділянки для складування деформуючого інструменту під певні типорозміри;

- неефективність процесу при виготовленні колінчатих валів в одному примірнику (одиничне виробництво).

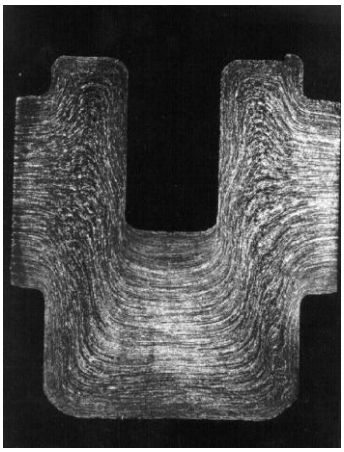


Рисунок 1.11 – Розташування волокон металу в поковці виготовленій за TR методом.

Рисунок 1.12 – Поковка колінчастого вала, виготовлена за TR методом

1.3.3 Виготовлення поковок колінчастих валів вільним куванням

Поковки великогабаритних колінчастих валів виготовляються лише в одному або декількох екземплярах, та зазвичай застосовуються в дизельних двигунах електрогенераторів, кривошипних машинах на виробництвах або суднобудуванні. Зазвичай такі поковки виготовляють вільним куванням на гідравлічних пресах зі зливків масою від 2-3 до 25 та більше тон.

Схожою за своєю схемою до вільного кування колінчастих валів є розробки закордонних авторів [30, 31]. В даному випадку використано складну конструкцію, яка дозволяє обтискати заготовку шістьма тонкими бойками для отримання шатунних шийок багато колінчастого великогабаритного валу. Даний спосіб є доволі цікавим, так як він дозволяє спрофілювати заготовку до форми, наближеної до кінцевої, що дозволяє економити певну кількість металу при механічній обробці такого колінчастого валу. При цьому маса поковки складає декілька десятків тон, а вихідною заготовкою є зливок, який спочатку осаджують, а потім протягують до необхідних розмірів, і вже після цього профілюють складним інструментом. Такий спосіб кування схожий також із TR методом, і має такі самі недоліки, тому слід розглянути можливості вільного кування для одиничного

виробництва великогабаритних одноколінчастих валів при використанні універсального інструменту (звичайних бойків з меншою товщиною).

Виходячи з аналізу вітчизняних літературних джерел, складена узагальнена технологічна схема кування колінчастого валу вільним куванням, представлена на рисунку 1.13.

Як бачимо, вихідний зливок попередньо осаджують, якщо це можливо, для збільшення укову. Якщо зливок завеликий для доступного обладнання – здійснюють операцію білетування та протягування без осаджування.

Далі заготовку протягують у комбінованих (або вирізних) бойках для отримання круглого перерізу або у пласких бойках для отримання прямокутного перерізу заготовки. При цьому діаметр (або розміри прямокутного перерізу) доводять до розмірів поковки. Після чого проводять розмітку та засічку металу для подальшого кування опорних шийок колінчастого валу. Далі слідує серія кантувань та обтиснень, завдяки яким поковка колінчастого валу отримує ексцентриситет. Після того, як буде виконано кування опорних шийок, поковку правлять до необхідних розмірів та симетрії.

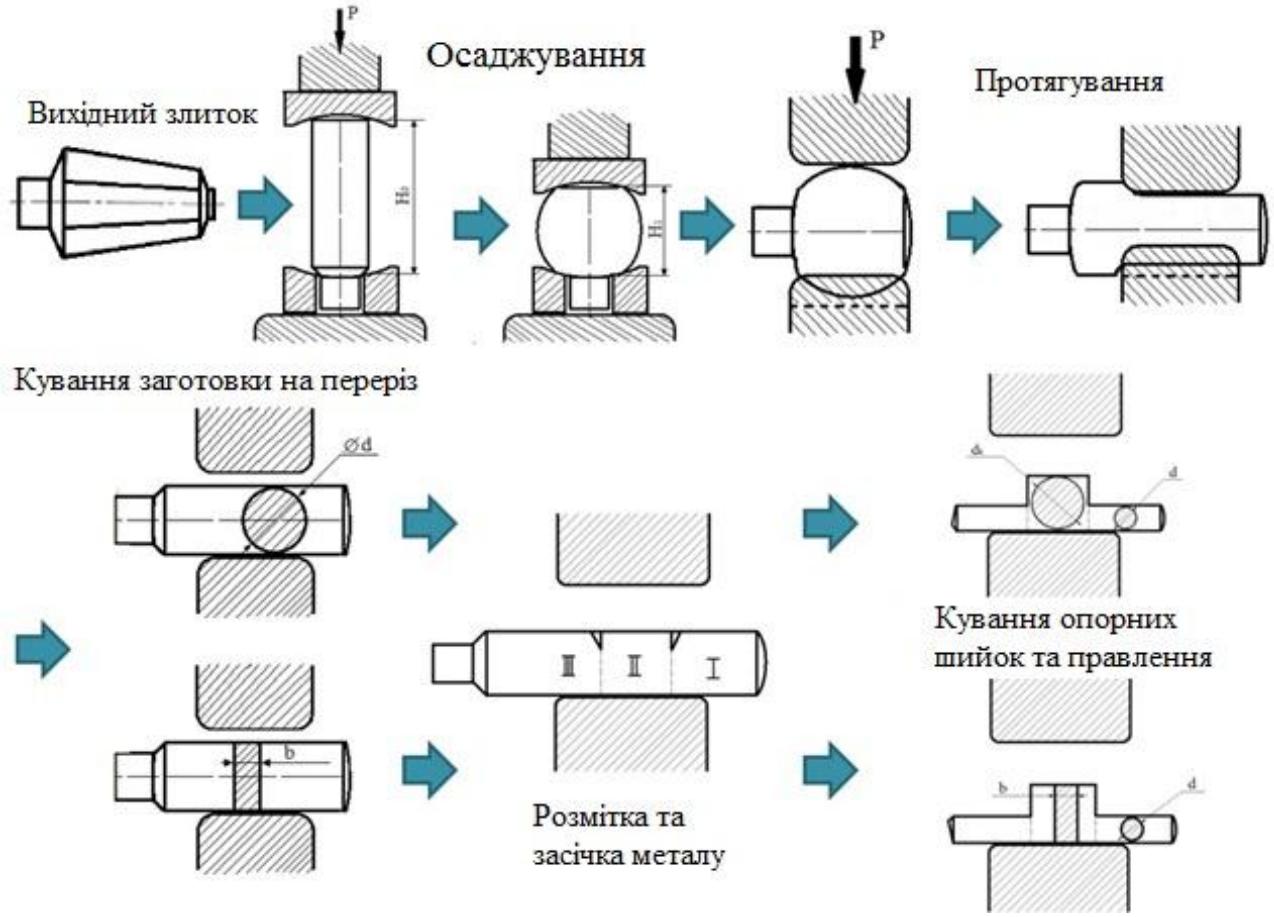


Рисунок 1.13 – Узагальнена технологічна схема виготовлення поковок колінчастих валів

Ця технологія виготовлення поковок колінчастих валів має основні етапи:

- білетування зливка;
- осаджування зливка;
- протягування зливка;
- кування опорних шийок;
- правка поковки;
- термічна та механічна обробка.

Першою стадією виготовлення поковки колінчастого валу є ковальська операція осаджування. Осаджування – це процес, який полягає у деформуванні між двома плоско паралельними поверхнями циліндричної або призматичної заготовки, при якому зменшується її висота та збільшується

поперечний переріз. Найбільш простою та широко застосованою при виготовленні крупних поковок є осаджування плоскими плитами. Процес осаджування є доволі вивченим процесом, і в деяких літературних джерелах [32, 33] представлено багато даних щодо розрахунку процесу формозміни металу або розрахунку силових параметрів, однак і в наш час проводиться багато досліджень по вдосконаленню технології процесу осаджування для підвищення механічних властивостей металу. Також процес осаджування використовується для вимірювання механічних властивостей так званими пластометричними методами тестування [34]. Вирішальну роль в формуванні, необхідних споживачу, механічних властивостей надає виникаючий в процесі осаджування напружено-деформований стан. Такі параметри осаджування, як сумарний ступінь деформації (ε_Σ), фактор форми заготовки (H/D), міждеформаційна пауза ($t_п$), швидкість деформації ($\acute{\varepsilon}$) та температура початку процесу осаджування (T_0) мають вплив на напружено-деформований стан поковки та зокрема на нерівномірність розподілення деформацій.

Сам по собі процес осаджування має багато недоліків, таких як: велика сила деформації; значна ступінь бочкоутворення, метод вимірювання якої розглянуто в статті [35]; висока нерівномірність розподілення деформацій в об’ємі заготовки з формуванням зон ускладненої деформації. Згідно даним із джерела [36], при осаджуванні заготовок в них виникають різні зони деформації. Так, к робочому інструменту прилягають зони ускладненої деформації, до них прилягають зони локалізованої деформації. На бокових поверхнях виникають зони, в яких виникають розтягуючи напруги. В центрі заготовки виникає зона з рівномірним розподіленням найбільш високих показників деформації.

Також ця операція застосовується для збільшення величини укову (У), яка є показником ступеню проробки металу при вільному куванні. При осаджуванні ступінь проробки металу (уков) розраховується за наступною формулою:

$$У = H_1/H_0 = F_0/F_1 \qquad (1.1)$$

де, H_0 – початковий діаметр заготовки (зливка);

H_1 – кінцевий діаметр заготовки після осаджування;

F_0 – початкова площа поперечного перерізу заготовки (зливка);

F_1 – кінцева площа поперечного перерізу після осаджування

Операція осаджування зливка в даному випадку застосовується для того, щоб знищити литу (дендритну) структуру металу та поліпшити пластичність металу при подальшому куванні.

Наступною операцією кування у технології виготовлення поковок колінчастих валів є операція протягування.

Протягування, або ковальська витяжка, є одною з найбільш досліджених операцій кування. Протягуванню присвячені роботи по дослідженню впливу форми деформуючого інструменту на формозміну металу та напруження при деформації [37-41]. Існує багато робіт присвячених визначенню найбільш раціональних параметрів процесу протягування, таких як величина подачі, схема кантувань, кути кантувань та ступінь деформації за одиничне обтиснення.

Одним з видатних вчених в даній області досліджень є Я.М. Охрименко, роботи якого присвячені дослідженню кожного з параметрів протягування та їх вплив на напружено-деформований стан [32, 36]. Також слід зауважити, що ступінь проробки металу для операції протягування визначається за такою ж формулою, як і для осаджування, однак можливий розрахунок величини укову як для одиничного обтиснення, так і для всієї операції протягування в цілому.

Також важливими є дослідження В.А. Назар’яна [42-44], в яких розглянуто основний підхід до призначення режимів кування, а саме визначенню раціональної форми деформуючого інструмента, тобто найбільш вигідної з точки зору напружено-деформованого стану металу, а також раціональних кутів кантувань та величини подачі для отримання заданої форми кінцевої поковки (поковки гладкого валу). До схожих досліджень можна віднести також досліди, показані у роботі [45]. В цьому дослідженні приведено найбільш раціональну схему деформування, а саме форму

інструменту та схему кантувань, для забезпечення закриття осьової пористості зливка при куванні.

1.4 Комп’ютерне моделювання процесів вільного кування

Дослідження напружено-деформованого стану металу під час кування є досить складним, тому останнім часом широке застосування набули програми для комп’ютерного моделювання процесів обробки металів тиском на основі скінченно-елементного методу. Комп’ютерне моделювання процесів ОМТ застосовують для аналізу формозміни, виникнення дефектів, визначення необхідної сили деформування і т.д. За допомогою моделювання можливо визначити такі важливі параметри заготовки, як накоплений ступінь деформації, напруження, температура, напрямок розташування волокон металу, можливість руйнування інструменту. Однією з таких програм є програма QForm V8, яка дозволяє розрахувати формозміни заготовки та показники напружено-деформованого стану металу.

На даний час моделювання процесів ОМТ дозволяє побачити суть технологічних процесів виготовлення деталей, тобто оцінити напружено-деформований стан металу заготовки, а також оптимізувати параметри процесу, але не розробити його за технолога. Таким чином досвід технолога є і залишиться найважливішим складником при розробці технологічного процесу, а моделювання дозволяє при цьому лише підтвердити або спростувати ідеї або технічні рішення.

Споживачі продукції, яка виготовляється обробкою металів тиском, постійно вимагають від виробників покращення якості продукції на основі вдосконалення існуючих та розробки нових технологій. Впровадження нових технологій, зазвичай, пов’язане з проведенням промислових експериментів, які в свою чергу потребують великих фінансових витрат. Тому все частіше на виробництвах застосовують чисельні методи моделювання процесів, як перший етап у перевірці технології, яка планується до впровадження.

В процесах обробки металів тиском набув широкого застосування скінченно-елементний метод (МСЕ). Багато користувачів "ідеалізують" результати

розрахунків, отримані за допомогою цього методу. Однак слід мати на увазі, що МСЕ є числовим методом і базується на певних припущеннях. В процесі постановки задачі, завдання вихідних даних, складання рівнянь та їх чисельного рішення з візуалізацією результатів виникають похибки. Тому для грамотного використання програми QForm V8 і мінімізації можливих помилок слід розуміти, як функціонує програма і як правильно інтерпретувати результати розрахунку. У зв'язку з цим, прийнято порівнювати кінцеві дані експериментального дослідження (фізичного моделювання) і комп'ютерного моделювання для визначення правильності обраних параметрів процесу деформації, а також розробленої технологічної схеми в цілому.

1.5 Опис методики експериментального дослідження

Моделювання є методом дослідження, при якому досліджуваний об'єкт (модель) перебувають у певній відповідності з іншим об'єктом (натурою) [46]. При цьому методи моделювання поділяються на наближене, натурне, математичне і фізичне моделювання. При фізичному моделюванні модель і досліджуваний об'єкт мають однакову фізичну природу, але різні кількісні характеристики [47].

Основою фізичного моделювання є теорія подібності. У теорії подібності існують різні методи, які в принципі зводяться до пошуку безрозмірних величин критеріїв подібності. Постановка і реологія експерименту на основі теорії подібності спрощується і полегшується ще завдяки тому, що в цьому випадку знаходиться функціональний зв'язок між цілими комплексами величин, які визначають явище, і в ряді випадків немає потреби вивчати вплив на процес кожного фактора окремо.

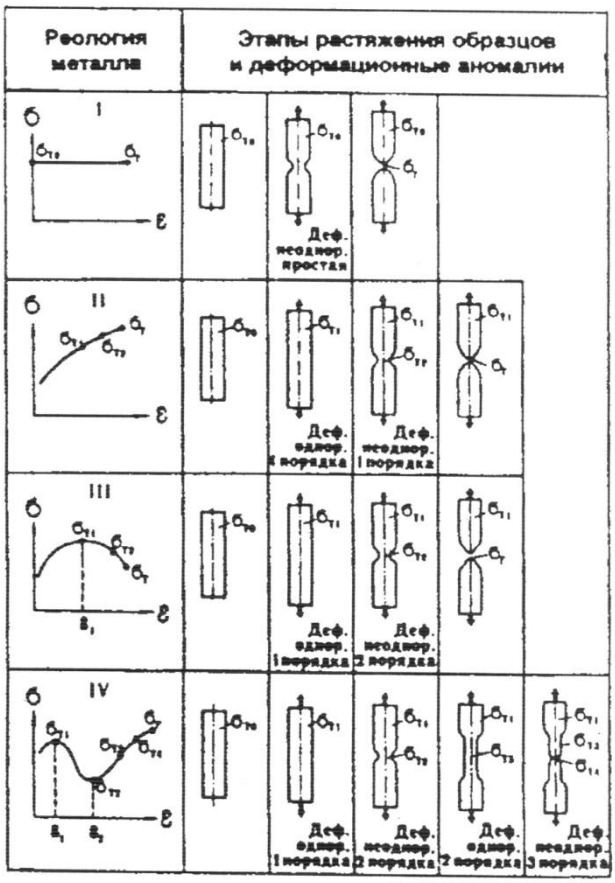
Перші спроби встановлення законів подібності стосовно обробки металів тиском здійснювалися Кірпічевим В. Л. [48]. А в роботах Колмогорова В.Л. [49] Ільюшина А. А. [50], Смірнова В. С. [51], Чекмарьова А. П., Качайлова А. П. [52] та інших було отримано ряд критеріальних залежностей які виявилися непридатними для практичного використання при моделюванні процесів обробки металів тиском.

Процес обробки металів тиском характеризується великим числом параметрів. При складанні їх списку, особливо, для випадку складного маловивченого процесу, легко упустити суттєві величини [53]. Отримавши замкнуту систему рівнянь і граничні умови, тобто, розробивши строгу математичну модель процесу, можна отримати найбільш обґрунтований ряд критеріїв подібності. Однак у випадку, якщо явище не вивчено і немає навіть наближеного його математичного опису, слід вдаватися до фракційного (часткового) аналізу, що дозволяє використовувати будь-яку інформацію для вирішення завдання [54]. При цьому обмежений список параметрів дозволяє побудувати лише грубо наближену модель. Дослідження на ній створюють передумови для розробки більш точної моделі. Дуже важливе місце при фізичному моделюванні займає облік закономірностей розвитку деформації металів. Розділ науки, що вивчає розвиток і взаємозв'язок деформацій і напружень у процесах їх пластичної формозміни, носить назву реології [55].

У практиці пластичної формозміни металів залежність опору деформації визначають, як правило, тільки від ступеня, швидкості деформації і температури. Такому спрощенню, певною мірою, сприяла "гіпотеза траєкторій деформацій малої кривизни", запропонована Ленським В. С. [56] і розвинута в працях Ільюшина А.А. [57].

Аналіз широкого спектру інформації по реологічним кривим показує, що матеріали, які пластично деформуються, розділяються на реологічно прості які не зміцнюються ($d\sigma/d\varepsilon=0$) або які зміцнюються з монотонно зростаючою функцією σ-ε ($d\sigma/d\varepsilon>0$) і реологічно складні – які зміцнюються та мають на кривих σ-ε екстремуми [58-61]. Всі метали, які пластично деформуються, за реологічною складністю класифіковані Шломчаком Г.Г. [62]. Дана класифікація подана на рис. 3.1. Перший клас включає реологічно прості метали, які не зміцнюються. Другий клас - це реологічні метали, які зміцнюються з монотонно зростаючою функцією σ-ε. До цього класу відносяться практично всі метали, які деформуються у холодному стані, і початкові стадії гарячого їх деформування. Третій клас характеризується наявністю одного максимуму на реологічних кривих σ-ε. До нього відносяться всі вуглецеві і більшість легованих сталей при температурах гарячого деформування, а

також деякі кольорові метали. Четвертий реологічний клас металів відрізняється наявністю двох екстремумів на кривих. Крім цього, метали, які характеризуються наявністю трьох і більше екстремумів (мідь і її сплави), віднесені до п'ятого класу.



1.15 Реологічні класи матеріалів [58]

Приступаючи до вивчення будь-якого явища або процесу, необхідно визначити його параметри, по можливості встановити функціональні зв'язки між ними, і проаналізувати з точки зору теорії подібності (аналізу розмірностей).

Теорія подібності базується на трьох основних теоремах. Перша теорема подібності формулюється так: у явищ, подібних фізично, математично і так далі, можна знайти поєднання параметрів, які називаються критеріями подібності, що мають однакові чисельні значення [63]. Друга теорема звучить так: у будь-якої фізичної задачі ми маємо одну або кілька залежних змінних, кожна з яких є функцією деяких незалежних параметрів. Незалежним параметром є величина, задана в процесі дослідження. Залежною змінною називають величину, яка

функціонально залежить від параметрів. Також існує і третя теорія подібності, яку використовують, в основному, коли важко застосувати другу теорему для визначення якості критеріїв. Третя теорема звучить так: необхідною і достатньою умовою для створення подібності є пропорційність східних параметрів, що входять в умову однозначності, і рівність критеріїв подібності досліджуваного явища. Під умовою однозначності розуміють визначені індивідуальні особливості процесу: геометричні властивості системи, фізичні, початкові властивості та інші.

Шломчак Г. Г. сформулював додаткові правила фізичного моделювання процесів обробки металів тиском, які випливають з теорії подібності:

- так як згідно з першою теоремою критерії подібності двох подібних процесів повинні мати однакове числове значення, то, незважаючи на можливість скорочення розмірностей, і їх кінцевому вираженні не повинно бути параметрів зі значенням «нуль» або «нескінченність»;

- при розробці будь-якої математичної моделі оптимальний опис досліджуваного процесу має містити мінімальну кількість параметрів;

- визначальні критерії подібності переважно повинні містити первинні величини;

- при розробці критеріїв подібності для групи параметром однієї розмірності призначають переважно один масштаб.

Використання цієї методики дозволило виміряти мінімальну кількість критеріїв реологічної подібності в порівнянні з іншими теоріями та врахувати при цьому реологію складних металів. Ця система критеріїв може бути використана для моделювання процесів пластичної формозміни металів із монотонно зростаючими функціями σ-ε, але і зі складними, і не тільки такими залежностями в рамках фракційного аналізу деформованого металу. До додаткових параметрів відносяться параметри контактної взаємодії робочої поверхні інструменту і деформованого металу. Процеси, що супроводжуються контактною взаємодією, обумовлюється додатковими геометричними і мікро геометричними параметрами або додатковими емпіричними рівняннями.

Коефіцієнт тертя, що є деякою умовною величиною, отриманою без врахування вимог теорії подібності, не може бути використаний в якості визначального критерію подібності для цілей фізичного моделювання, так як він представляє відношення двох залежних змінних.

1.6 Висновки до розділу 1

Згідно з аналізом літератури, колінчастий вал є найбільш складною при виготовленні деталлю, а також найбільш вимогливим до якості, тобто до механічних властивостей та геометрії. На даний час не існує стандартів, які описують вимоги до механічних властивостей та геометрії поковок колінчастих валів, тому, для цих потреб, використовують стандарти, які висувають вимоги до поковок в цілому. Існує декілька способів виготовлення колінчастих валів, а найбільш розповсюдженими є штампування, висаджування-гнуття (TR-метод) або вільне кування. Метод штампування та висаджування-гнуття мають перевагу в тому, що поковка має наближену форму до готової деталі, однак мають жорсткі обмеження по масі поковки а також складний за конструкцією інструмент, що виключає використання цих методів при одиничному виробництві. Метод вільного кування, навпаки, забезпечує можливість одиничного виробництва та використовує універсальний інструмент для виготовлення різноманітних за формою поковок, у тому числі колінчастих валів. Однак, виходячи із аналізу результатів, отриманих вітчизняними та закордонними вченими, видно що дослідження за питанням виготовлення поковок великогабаритних колінчастих валів вільним куванням, не є розробленим повною мірою.

На основі аналізу літературних джерел та технологічних схем виготовлення поковок колінчастих валів, було виявлено, що в існуючій технології виготовлення великогабаритних колінчастих валів не враховується повною мірою кінцева форма деталі, що спричиняє додаткові витрати металу. Це викликано тим, що на даний час при проектуванні поковки, корінна

частина валу закривається технологічним напуском. В процесі кування, при цьому, застосовують бойки, геометрія та розміри яких «нормалізовані» на підприємствах, але не визначені стандартом. Тобто відношення ширини бойка (його товщини) до діаметра заготовки, який необхідно отримати зі злитка масою 6,5 т, складає 0,5 та більше. Таким чином, ця проблема є наслідком недостатнього знання, щодо використання деформуючого інструменту меншої товщини (тонких бойків), для отримання шатунної шийки колінчастого валу, а також невідомі раціональні параметри кування при використанні «тонких» бойків і вплив цих параметрів на формозміну металу.

Виходячи із усього вищесказаного, є актуальним визначення раціональних параметрів процесу кування шатунної шийки тонкими бойками, а також розробка рекомендацій по застосуванню тонких бойків.

2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНИ МЕТАЛУ ПРИ КУВАННІ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ

2.1 Вдосконалення методу оцінки нерівномірності деформацій в поковці

У розробках, присвячених вдосконаленню режимів кування, які були виконані у співавторстві із Чухлібом В.Л. із використанням методів комп'ютерного моделювання, розглядаються вплив ступеню деформації та наявності міждеформаційної паузи при осаджуванні на напружено-деформований стан металу [64], вплив фактора форми та ступеню деформації на напружено-деформований стан металу при осаджуванні заготовок з їх подальшим протягуванням [65], а також визначення впливу параметрів протягування на деформований стан поковки [66]. В цих дослідженнях використано спільно розроблений метод оцінювання нерівномірності деформацій в металі при комп'ютерному моделюванні. Для оцінки рівномірності розподілення деформацій, яка представляє собою найменше відхилення показників еквівалентної деформації між собою в перерізі, був розрахований коефіцієнт нерівномірності деформації $К_Н$. Коефіцієнт нерівномірності деформації може приймати значення не більше одиниці, так як є відношенням показників еквівалентної деформації в контрольних точках перерізу до максимального значення еквівалентної деформації в перерізі. Даний вираз можна записати у вигляді формули:

$$К_н = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{max}}, \text{ де} \tag{2.1}$$

ε_i – значення еквівалентної деформації в точці;

ε_{max} – максимальне значення еквівалентної деформації в перерізі.

Для оцінки об'ємної нерівномірності використовується три перерізи по довжині (висоті) заготовки. Щоб розглянути розподілення деформацій в перерізі, було знайдено в точку з максимальним значенням еквівалентної деформації і відносно неї побудовано 4 лінії, які розташовані під кутом 45° одна до одної та

перетинаються в центрі перерізу. Далі на кожну лінію було нанесено 6 контрольних точок симетрично до точки з максимальним значенням та симетрично до центру перерізу. Дана схема розташування точок зображена на рисунку 2.1.

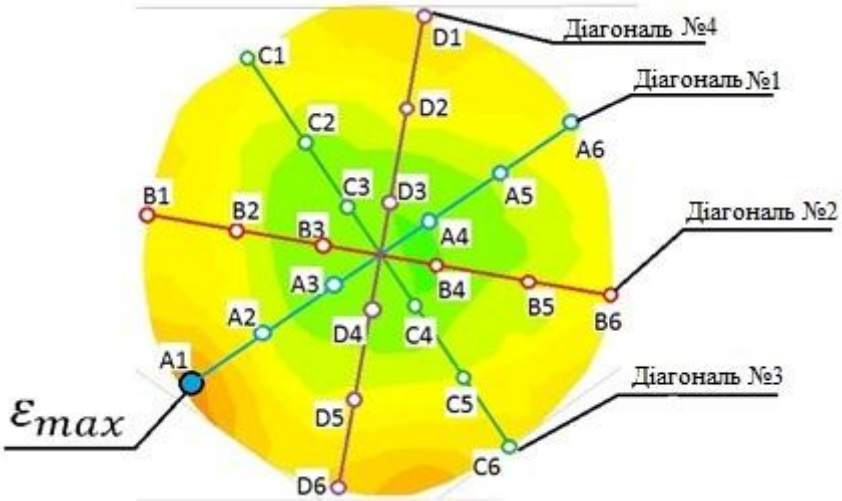


Рисунок 2.1 – Розташування точок та діагоналей в перерізі поковки

Таким чином, побудувавши графік за значеннями $К_Н$ на діагоналях і в точках, було отримано розподілення деформацій в перерізі, яке зображено на рисунку 2.2

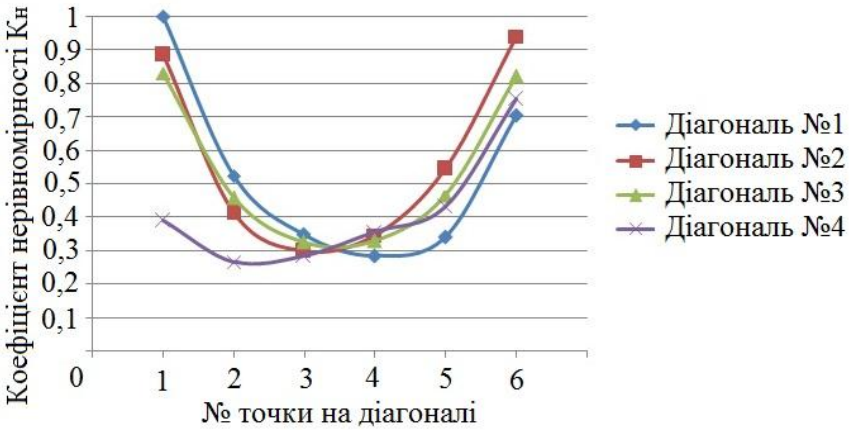


Рисунок 2.2 – Розподілення деформацій в перерізі поковки

Як бачимо, даний метод не зовсім коректно відображає нерівномірність деформацій, так як найбільша рівномірність, у даному випадку, спостерігається лише в одній точці, і має значення одиниці, при цьому усі інші точки відображають

нерівномірність. Це є наслідком того, що за основу розрахунку коефіцієнта нерівномірності береться максимальне значення еквівалентної деформації в перерізі.

Щоб отримати найліпшу якість продукції, необхідно мати в поковці однакові значення механічних властивостей у всіх напрямках та перерізах. Механічні властивості поковки напряму залежать від ступеню проробки металу, про який свідчить величина деформації. Таким чином, щоб оцінити нерівномірність деформації в металі, необхідно при розрахунку коефіцієнта нерівномірності відштовхуватися не від максимального значення деформації, а від середнього значення деформації в перерізі. Тобто, якщо записати цей вираз у вигляді формули, то отримаємо:

$$К_{н\ ср} = \frac{\sum К_{н\ i}}{i} \tag{2.2}$$

Як бачимо, середнє значення розраховується, як сума коефіцієнтів нерівномірності відносно кількості точок у перерізі, яка в даному випадку складає 24. Далі необхідно розрахувати показник нерівномірності $П_Н$, який є різницею по модулю між середнім значенням коефіцієнта нерівномірності в перерізі та розрахованого значення в точці. Також це можна назвати відхиленням коефіцієнта нерівномірності в точці від середнього значення, а саме від рівномірного розподілення деформації. Такий вираз можна записати у вигляді:

$$П_н = \left[К_{н\ ср} - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{max}}\right] \tag{2.3}$$

Обробивши ті ж самі дані комп’ютерного моделювання таким чином, отримуємо графік розподілення деформацій, який показує безпосередньо величину нерівномірності. На рисунку 2.3 зображено графік зміни величини показника нерівномірності в перерізі.

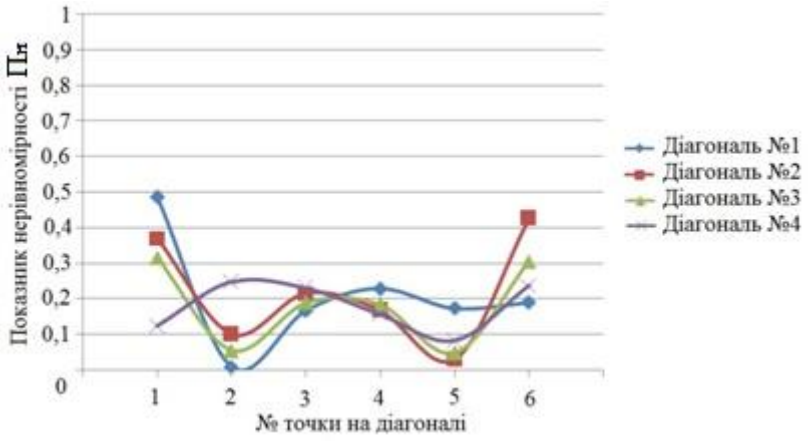


Рисунок 2.3 – Показник нерівномірності $П_Н$ в перерізі поковки

Як бачимо, в даному випадку, показник нерівномірності більш точно описує нерівномірність деформацій в перерізі, так як показує величину відхилення коефіцієнта нерівномірності деформації від середнього значення, тобто від нуля, як найбільш рівномірного розподілення деформацій. Найбільшою нерівномірністю в даному випадку вважається значення $П_н$, яке дорівнює 1.

Таким чином, розробка відрізняється урахуванням різниці між середнім значенням коефіцієнту нерівномірності по перерізу поковки та значеннями цього параметру у певних точках перерізу. Це дозволяє узгодити рівень оцінюваної нерівномірності деформації по перерізам з її кількісним вираженням, а також адекватно оцінювати величину нерівномірності та визначати раціональні режими деформування при куванні.

2.2 Початкові параметри та граничні умови

Усе частіше в багато чисельних літературних джерелах, на міжнародних наукових конференціях та в інтернеті можна зустріти випадки використання чисельного моделювання процесів ОМТ. В ряді робіт, присвячених вирішенню трьохмірних технологічних задач ОМТ, широко рекламується використання чисельних методів моделювання процесу за допомогою готового програмного забезпечення, яке розроблено спеціалізованим науковим колективом.

Однією з найбільш відомих комерційних програм для вирішення задач ОМТ є програма QForm (Micas Simulation, Great Britain). QForm – це спеціалізований інженерний програмний комплекс, який призначений для аналізу процесів обробки металів тиском та термічної обробки.

Для досліджень формозміни при вдавлюванні тонкого бойка та послідуючому куванні шатунної шийки було застосовано комерційний програмний пакет QForm. Кафедра обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова (НМетАУ) володіє ліцензією на даний програмний пакет, тому автором було вирішено проводити дослідження, пов’язані з чисельним моделюванням на кафедрі ОМТ (НМетАУ).

Ця програма дозволяє перевіряти, відпрацьовувати та оптимізувати технологічні процеси безпосередньо за комп’ютером, а не в ході експериментів на виробництві методом проб та помилок. Завдяки цьому суттєво підвищується якість продукції та знижується собівартість та строки випуску продукції. QForm дозволяє моделювати практично усі процеси ОМТ, як наприклад, кування, прокатка, пресування та інші, а також дозволяє розраховувати термічну обробку виробів. Цей програмний комплекс застосовується майже у всьому світі, як на металургійних підприємствах, так і в науково-дослідницьких інститутах та університетах.

Також однією з особливостей даної програми є те, що вона має дуже гнучку модульну структуру, яка дозволяє користувачеві вибрати оптимальний набір модулів під номенклатуру задачі, яку необхідно вирішити.

Так, наприклад, існує можливість використання підпрограм, окремо від основної програми для розрахунку деформацій, напружень та швидкостей деформацій. Існує можливість розрахунку, наприклад, зношення інструменту, контактного тиску на заготовку або тензору деформацій та напружень. Окрім цього можливе написання власної підпрограми на мові програмування Lua.

В основу математичної постановки задачі покладена система рівнянь, що включає рівняння рівноваги, рівняння зв'язку між полем швидкостей матеріальних точок і швидкостей деформацій, рівняння зв'язку між напруженим і деформованим станом, умови нестисливості, критерій пластичності, рівняння енергетичного балансу. Опір деформуванню матеріалу заготовки вважається залежним від

накопиченої деформації, поточної швидкості деформації і температури і задається у вихідних даних. Користувач може задати залежність опору деформуванню від інших параметрів, що розраховуються в підпрограмах користувача. Матеріал вважається ізотропним і ізотропно зміцнюючимся. Тертя на контакті між інструментом і заготовкою враховується законом тертя Зібеля, Леванова, Кулона або змішаним.

Алгоритм програми QForm V8 передбачає послідовне вирішення задач механіки деформування і теплових процесів. Таким чином, на кожному кроці розрахунку розподілення температури по об’єму заготовки вважається незмінним. Для рішення задачі визначення напружено-деформованого стану використовується система рівнянь механіки деформованого тіла.

Задоволенню системі диференціальних рівнянь рівноваги, граничних умов з урахуванням фізичних рівнянь Леві-Мізеса еквівалентне варіаційне формулювання, яка слідує з умови стаціонарності функціонала Маркова (знак δ означає варіацію)

$$\delta\Phi = \iiint_V \bar{\sigma}\delta\dot{\bar{\varepsilon}}dV - \iint_{F_p} p_i\delta v_i dF = 0 \qquad (2.4)$$

Перший доданок у правій частині функціоналу являє собою потужність внутрішніх сил (потужність пластичної деформації в об'ємі тіла V), другий - з потужністю відомих зовнішніх сил (F_p - поверхня, на якій задані зовнішні сили). При мінімізації функціоналу Маркова автоматично задовольняється система рівнянь рівноваги і силові граничні умови. Функціонал Маркова виходить безпосередньо з виразу для повної потужності деформованого тіла, якщо використовувати рівняння Леві-Мізеса в якості фізичних рівнянь.

Це формулювання використовується при виведенні роздільної системи рівнянь методу скінченних елементів для моделювання пластичної деформації в програмі QForm V8.

Далі розглянемо систему рівнянь, що дозволяє визначити напружений і деформований стан заготовки при ізотермічній пластичної деформації. Ця система включає в себе наступні рівняння:

- рівняння рівноваги.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0,\ i,j = 1,2,3 \tag{2.5}$$

- рівняння зв'язку між полем швидкостей матеріальних точок та швидкостей деформацій.

Діагональні компоненти тензора швидкостей деформацій являють собою швидкості подовження елементарних відрізків, паралельних відповідним координатним осям. Бічні компоненти - швидкості спотворення спочатку прямих кутів, розташованих в координатних площинах, тобто швидкості зсувних деформацій.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right),\ i,j = 1,2,3 \tag{2.6}$$

-фізичне рівняння Леві-Мізеса (рівняння зв'язку між напруженим та деформованим станом).

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2}\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\bar{\sigma}}\sigma'_{ij} \tag{2.7}$$

де: $\bar{\sigma}$ - ефективне напруження;

$\dot{\bar{\varepsilon}}$ – ефективна швидкість деформації (інтенсивність швидкості деформації);

$\dot{\varepsilon}_{ij}$ – тензор швидкостей деформації;

σ'_{ij} - девіатор напружень.

- умова нестискаємості (закон сталості об'єму).

$$3\dot{\varepsilon}_m = \dot{\varepsilon}_{ii} = \dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33} = 0 \tag{2.8}$$

Із закону сталості об'єму є важливий наслідок. При пластичній деформації одна з швидкостей деформації (справжніх деформацій) має знак, протилежний знаку двох інших, а за абсолютною величиною дорівнює їх сумі, тобто максимальна за абсолютною величиною.

- критерій пластичності.

$$\bar{\sigma} = \sigma_s \tag{2.9}$$

- реологічна модель матеріалу (зміна спротиву метала пластичній деформації).

За умовою пластичності Мізеса ефективне напруження дорівнює напруженню течії (опору пластичної деформації металу), яке залежить від ефективної (накопиченої) пластичної деформації, швидкості деформації і температури:

$$\sigma_s = f\left(\varepsilon_{ef}^{p}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T\right) \tag{2.10}$$

В цьому рівнянні ε_{ef}^{p} розраховується за формулою:

$$\varepsilon_{ef}^{p} = \int_t \dot{\varepsilon}^p dt \tag{2.11}$$

В комп’ютерній моделі задано змащування інструменту, як «без змащування», а фактор тертя при цьому дорівнює 0,8. За даними програми, тертя розраховується по закону Леванова, і виражається формулою:

$$\tau = mk\left(1 - e^{-b\frac{\sigma_n}{\sigma_s}}\right) \tag{2.12}$$

де: b – експериментальний коефіцієнт (по рекомендаціям Леванова b = 1,25)

Передача тепла теплопровідністю здійснюється при безпосередній контакт частин тіла з різною температурою. Диференціальне рівняння нестаціонарної

теплопровідності, що використовується для моделювання цього явища в програмі QForm V8 має вигляд:

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+q_G=pc\frac{\partial T}{\partial t} \tag{2.13}$$

або в скороченому вигляді:

$$k(\Delta T)+q_G=\rho c\dot{T} \tag{2.14}$$

де:

T – температурне поле;

t – час (с);

k – коефіцієнт теплопровідності (Вт\м*К);

ρ - щільність матеріалу (кг\м^3);

c – питома теплоємність (Дж\кг*К);

q_G - потужність внутрішнього джерела тепла (Вт\м^3).

Після задачі усіх необхідних даних проводиться безпосередній розрахунок. Попередній аналіз результатів математичного моделювання показав наявність адекватних якісних ефектів при формозміні заготовки. Математичне моделювання проводилося при використанні тонких бойків різної товщини. На рисунку 2.4 зображено елементну сітку, яка має менший розмір елементів у зоні контакту інструменту та заготовки, а також змінюється в процесі розрахунку пластичної деформації металу. Приклад візуалізації отриманих даних при формозміні по етапах деформації, а саме на початку процесу та після вдавлювання бойка в заготовку, приведено на рисунку 2.4.

При цьому, оцінка деформації при моделюванні здійснюється через розгляд величини ефективної деформації, яка розраховується як сума приросту інтенсивності деформації у вздовж траєкторії руху матеріальної точки. Термін «інтенсивність деформації» застосовується при розрахунку «малих» деформацій [67,

68], тобто, «мала» деформація - це величина сумарного ступеню деформації, яка не перевищує величину 8-10%.

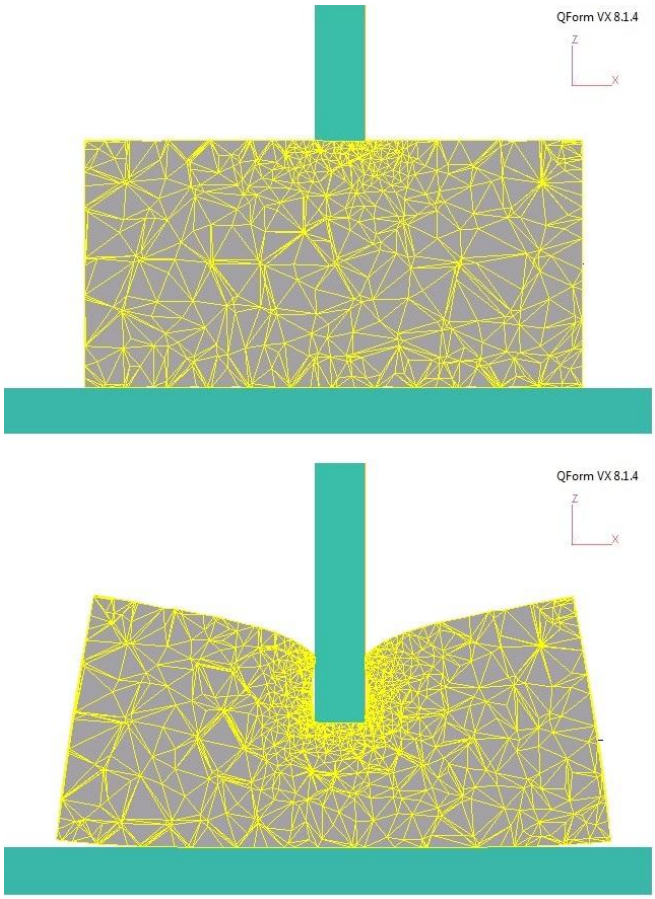


Рисунок 2.4 – Математичне моделювання процесу вдавлювання тонкого бойка в заготовку

При цьому, в даному досліджені розглянуті ступені деформації в інтервалі 30-70%. Однак, можна зробити припущення, що доки метал монотонно зміцнюється, згідно реологічних характеристик матеріалу, тобто до досягнення характерної величини деформації для конкретного сплаву, розвинення деформації буде проходити так само, як і при малих деформаціях. Таким чином, для сплаву 40ХН2МА, який використовується в даному дослідженні, має характерну величину деформації, яка дорівнює 60%. І таким чином, можливе використання ефективної деформації для оцінки деформованого стану поковки при куванні шатунної шийки великогабаритного колінчастого валу.

2.3 Дослідження формозміни заготовки за допомогою комп'ютерного моделювання при отриманні поковок колінчастих валів

Для дослідження формозміни заготовки за допомогою комп'ютерного моделювання при вдавлюванні тонкого бойка було розроблено план експерименту з варіюванням двох факторів.

Першим фактором експерименту є товщина деформуючого інструменту, яка дорівнює 4 мм, 8 мм та 12 мм (0,1..0,3 від діаметра заготовки $D_{заг}$). Другим фактором експерименту є глибина вдавлювання деформуючого інструменту в заготовку, яка дорівнює 12 мм, 20 мм та 28 мм (0,3..0,7 від діаметра заготовки $D_{заг}$, або 30-70% ступеню деформації). Таким чином, загальна кількість дослідів, необхідних для проведення усіх варіацій факторів процесу вдавлювання бойка, складає дев'ять дослідів. На основі аналізу технологічних схем виробництва поковок колінчастих валів, була обрана заготовка для подальших дослідів, яка представляє собою гладкий вал. Геометричні параметри заготовки були обрані згідно з об'ємом заготовки в реальному процесі кування колінчастого вала, з урахуванням масштабу експерименту, який дорівнює 17,5. Довжина циліндра була обрана з розрахунку виготовлення однієї поковки. Тому заготовкою був циліндр з діаметром 40 мм і довжиною 80 мм. В якості матеріалу заготовки для комп'ютерного моделювання використовувалася легована сталь 40ХН2МА.

На першій стадії дослідження, яка являє собою вдавлювання деформуючого інструмента в заготовку, в якості верхнього деформуючого інструменту було використано тонкий бойок, а в якості нижнього деформуючого інструменту – плиту для осаджування.

На рисунку 2.5 зображено вдавлювання бойка товщиною 8 мм в заготовку на глибину 20 мм.

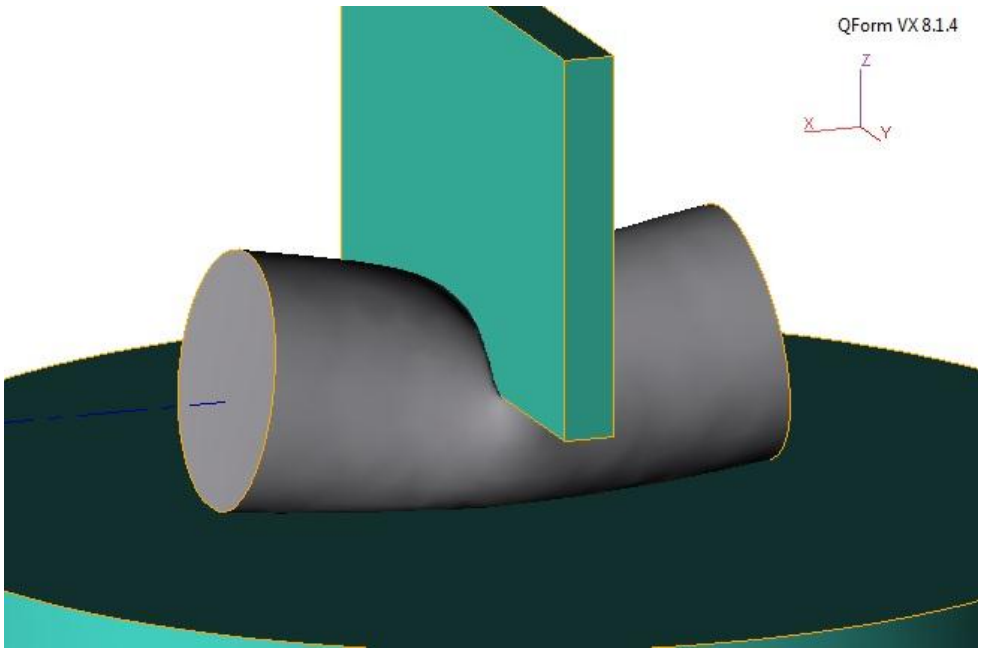


Рисунок 2.5 – Загальний вигляд процесу вдавлювання тонкого бойка в заготовку

На рисунку 2.5 зображено процес вдавлювання бойка в заготовку у загальному вигляді, однак вже зараз можливо помітити наскільки складною є формозміна металу. Помітно, що при деформації починається утяжка металу в повздовжньому напрямку заготовки у зонах контакту металу з верхнім деформуючим інструментом. Також помітно що частина металу під бойком підлягає поширенню у поперечному напрямку від осі заготовки. Таким чином, частина заготовки якби то підлягає осаджуванню, хоча це не є правильним терміном у даному випадку, так як лише частина заготовки деформується, на відміну від процесу осаджування, коли увесь об’єм металу деформується одночасно. В даному випадку, при деформації, заготовка має жорсткі кінці, які ускладнюють плин металу в повздовжньому напрямку.

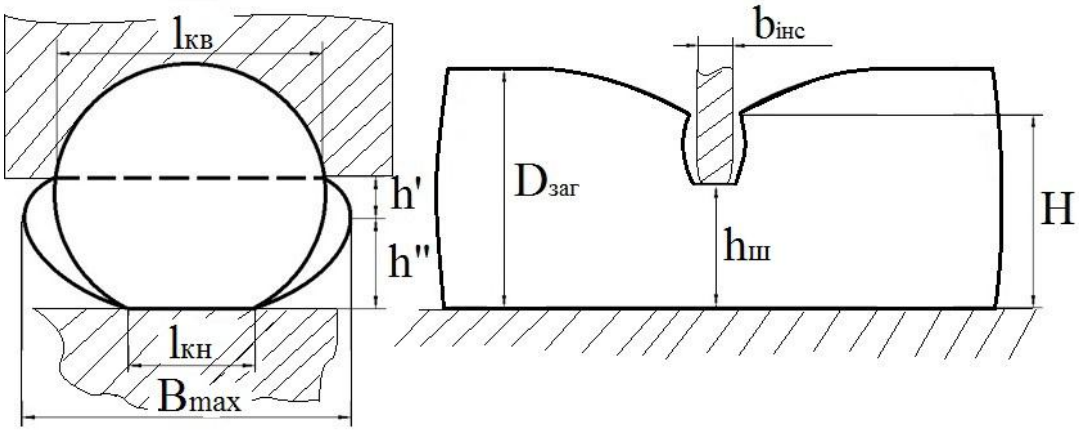
Формозміна заготовки при вдавлюванні «тонкого» бойка дуже складна і тому для опису форми заготовки після закінчення деформації були розглянуті наступні величини: B_{max} – максимальне поширення заготовки після деформації; $l_{кв}$ – довжина контакту заготовки та «тонкого» бойка; $l_{кн}$ – довжина контакту заготовки і нижнього деформуючого інструменту; h’ – відстань від зони контакту верхнього

деформуючого інструменту з заготовкою до точки з максимальною величиною поширення; h” – відстань від точки з максимальною величиною поширення до зони контакту заготовки з нижнім деформуючим інструментом; H – ефективний діаметр коліна; $h_ш$ – висота (майбутній діаметр) шатунної шийки; $b_{інс}$ – товщина інструменту; $D_{заг}$ – діаметр заготовки.

Також для аналізу формозміни заготовки було прийнято величину ΔD, яка є різницею максимального поширення заготовки та початкового діаметра [69]. Ця величина розраховується за наступною формулою:

$$\Delta D = B_{max} - D_0 \qquad (2.15)$$

Для аналізу формозміни металу необхідно розглянути заготовку в поперечному та повздовжньому перерізі в місці формування шатунної шийки. Для цього було розглянуто геометричні параметри заготовки, які зображено на рисунку 2.6.



а) б)

Рисунок 2.6 – Геометричні параметри заготовки у поперечному напрямку (а) та в повздовжньому напрямку (б) після вдавлювання тонкого бойка

На рисунку 2.7 зображено формозміну металу в зоні деформації при вдавлюванні тонкого бойка товщиною 4 мм на глибину 12 мм, 20 мм та 28 мм у поперечному перерізі заготовки.

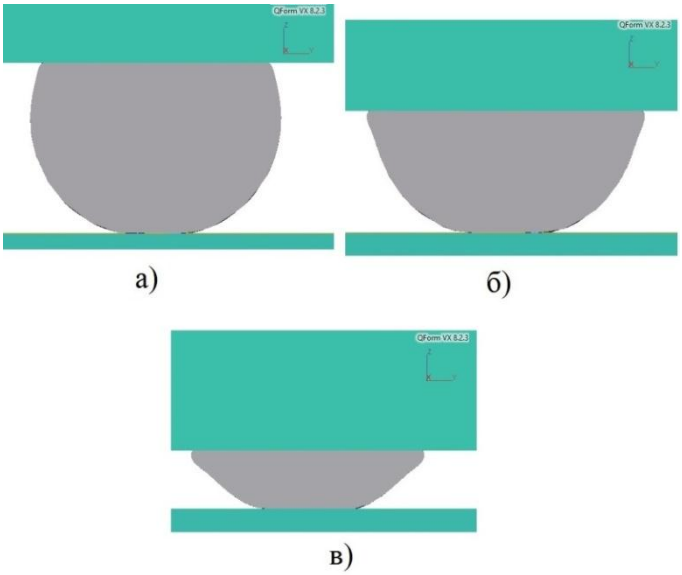


Рисунок 2.7 – Вдавлювання бойка товщиною 4 мм на глибину 12 мм (а), на 20 мм (б) та на 28 мм (в) у поперечному перерізі

На рисунку 2.8 зображено формозміну металу в зоні деформації при вдавлюванні тонкого бойка товщиною 4 мм на глибину 12 мм, 20 мм та 28 мм у повздовжньому перерізі заготовки.

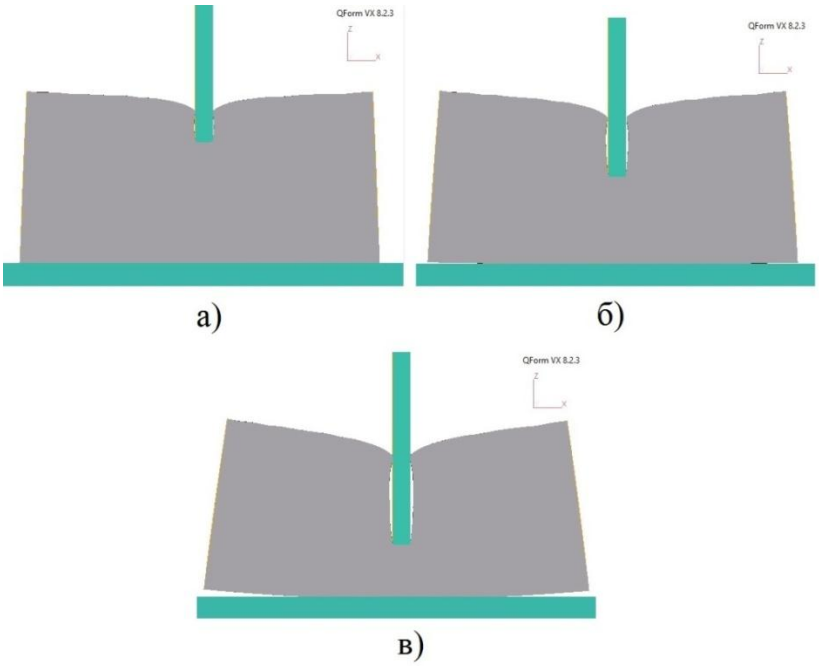


Рисунок 2.8 - Вдавлювання бойка товщиною 4 мм на глибину 12 мм (а), на 20 мм (б) та на 28 мм (в) в поздовжньому перерізі

Як бачимо, при меншому ступені деформації (рис. 2.7 а, рис. 2.8 а), спостерігається менша нерівномірність деформації, у поперечному перерізі заготовка залишається майже круглою, а в повздовжньому перерізі спостерігається незначна утяжина металу. При збільшенні ступеню деформації (рис. 2.7 в, рис. 2.8 в) спостерігається розвинення таких шкідливих явищ, як вигин заготовки у напрямку, протилежному руху верхнього інструмента (рис. 2.9 б). Також наслідком вигину заготовки є захват верхнього інструменту металом, що може спричинити заклинювання. На рис. 2.9, а, видно, що захват інструменту металом майже здійснився, тому ступінь деформації більший за 70% в даному дослідженні не використовується. В поперечному перерізі, в даному випадку, спостерігається дуже сильне поширення металу, що також є не бажаним, так як при подальшому куванні збільшується кількість необхідних обтиснень для отримання шатунної шийки необхідного діаметру.

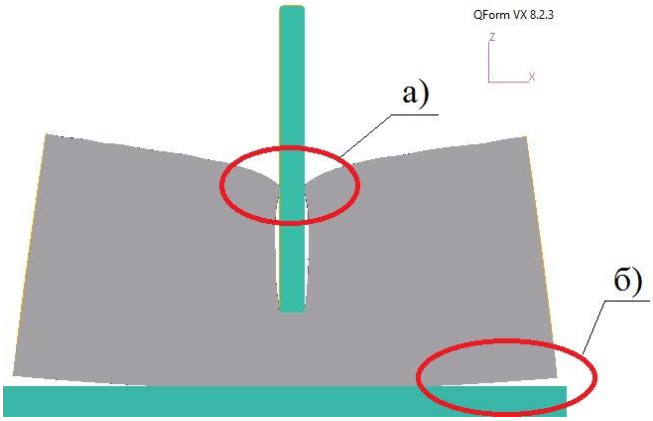


Рисунок 2.9 – Шкідливі явища при вдавлюванні тонкого бойка. Заклинювання бойка металом заготовки (а), відрив кінців заготовки від плити для осаджування (б)

Далі розглянемо процес вдавлювання бойка товщиною 8 мм в заготовку.

На рисунку 2.10 зображено формозміну металу в зоні деформації при вдавлюванні тонкого бойка товщиною 8 мм на глибину 12 мм, 20 мм та 28 мм у поперечному перерізі заготовки.

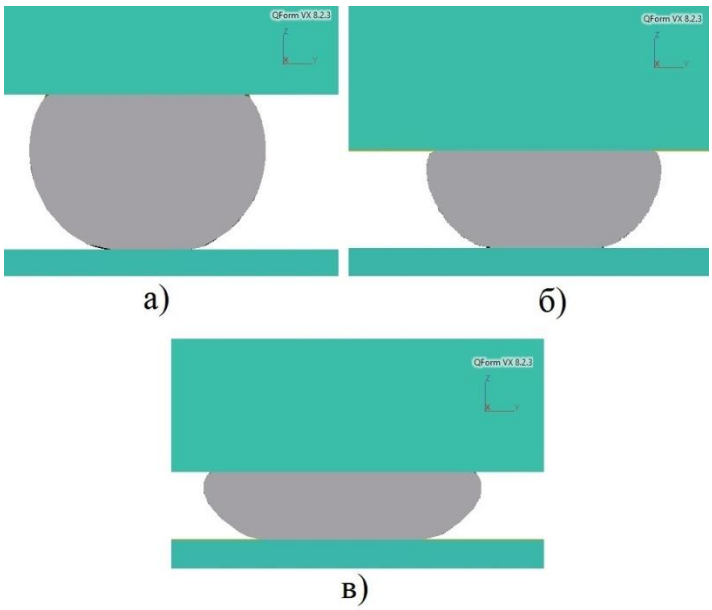


Рисунок 2.10 - Вдавлювання бойка товщиною 8 мм на глибину 12 мм (а), на 20 мм (б) та на 28 мм (в) в поперечному перерізі

На рисунку 2.11 зображено формозміну металу в зоні деформації при вдавлюванні тонкого бойка товщиною 8 мм на глибину 12 мм, 20 мм та 28 мм у повздовжньому перерізі заготовки.

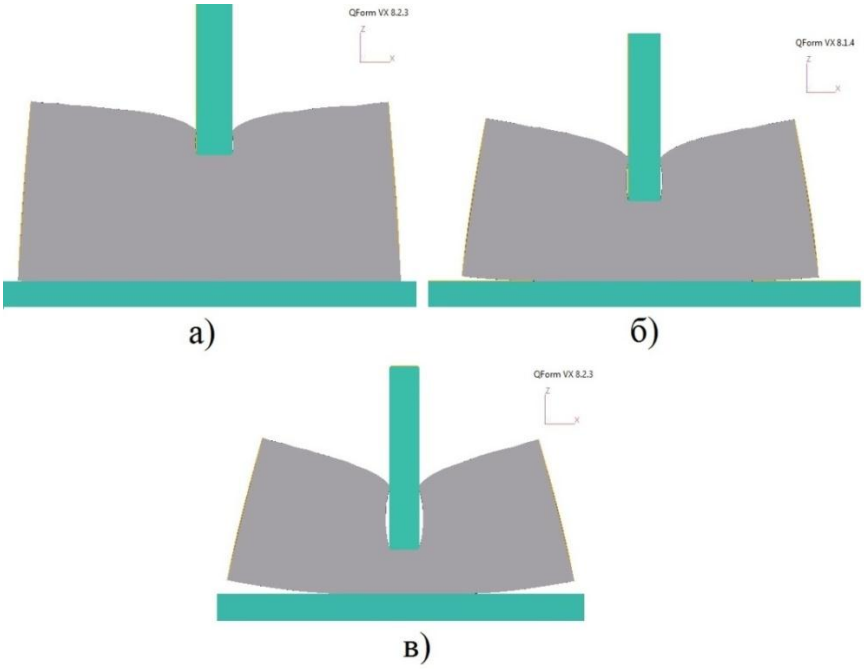


Рисунок 2.11 - Вдавлювання бойка товщиною 8 мм на глибину 12 мм (а), на 20 мм (б) та на 28 мм (в) в повздовжньому перерізі

Як бачимо, в даному випадку спостерігається більш сильне викривлення заготовки, за рахунок більшого об’єму металу який деформується, і як наслідок – більш інтенсивної течії металу. Більш сильна течія металу при цьому спостерігається у нижній частині зони деформації. Також спостерігається більш сильна утяжина металу, ніж у попередньому випадку.

Далі розглянемо процес вдавлювання бойка товщиною 12 мм в заготовку.

На рисунку 2.12 зображено формозміну металу в зоні деформації при вдавлюванні тонкого бойка товщиною 12 мм на глибину 12 мм, 20 мм та 28 мм у поперечному перерізі заготовки.

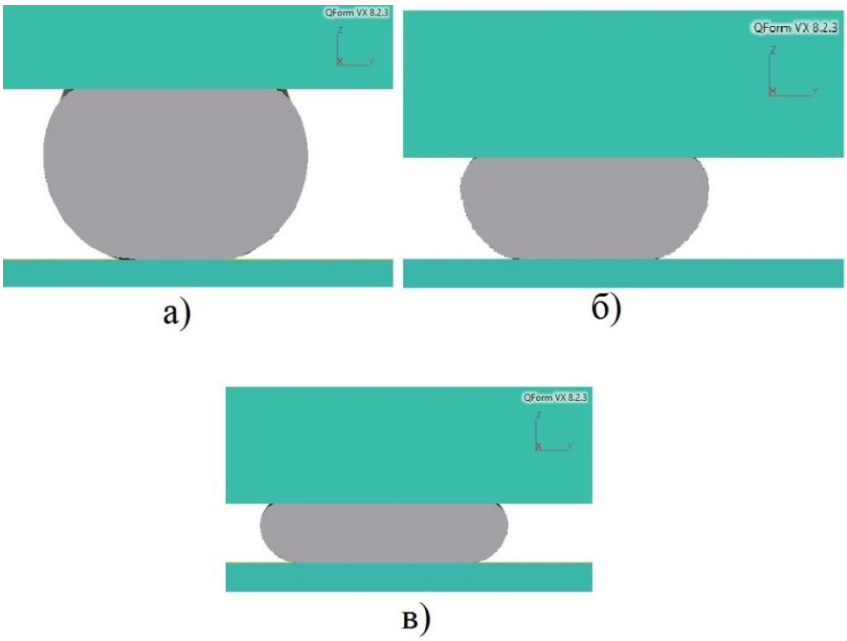


Рисунок 2.12 - Вдавлювання бойка товщиною 12 мм на глибину 12 мм (а), на 20 мм (б) та на 28 мм (в) в поперечному перерізі

На рисунку 2.13 зображено формозміну металу в зоні деформації при вдавлюванні тонкого бойка товщиною 12 мм на глибину 12 мм, 20 мм та 28 мм у повздовжньому перерізі заготовки.

При вдавлюванні бойка товщиною 12 мм в заготовку, спостерігається найбільше викривлення. При глибині вдавлювання більше 20 мм спостерігається сильне відставання кінців заготовки від нижньої плити.

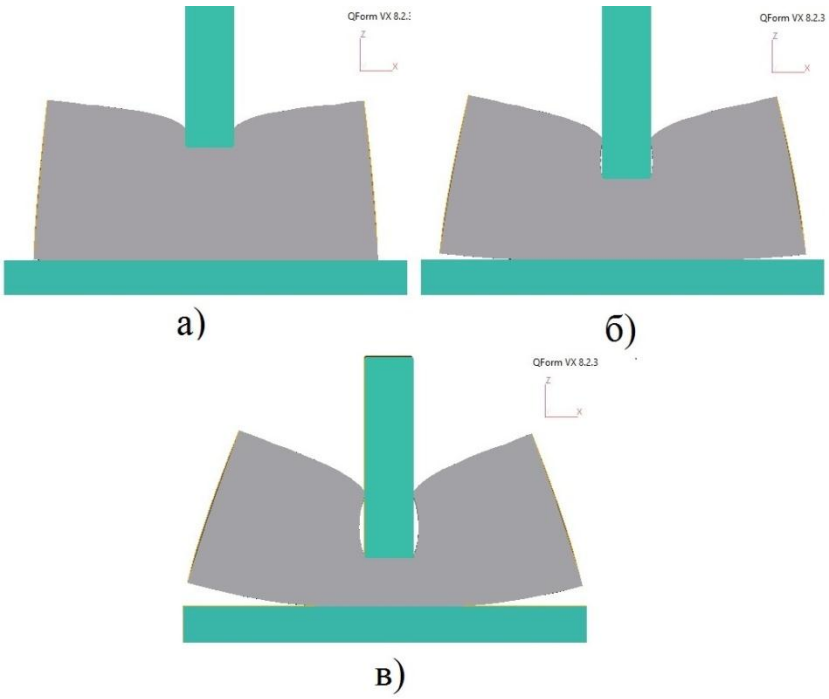


Рисунок 2.13 - Вдавлювання бойка товщиною 12 мм на глибину 12 мм (а), на 20 мм (б) та на 28 мм (в) в повздовжньому перерізі

Таким чином можна зробити висновок, що в даному випадку, для даних розмірів заготовки, глибина вдавлювання бойка в заготовку не повинне перевищувати 50% від її діаметра, з огляду на надмірно сильне викривлення, як в поперечному так і в повздовжньому напрямку, яке при подальшому куванні важко усувається. Також, ця величина не повинна бути менше 20%, так як в такому випадку дана схема стає неефективною.

Товщина деформуючого інструменту так само має сильний вплив на формозміна поковки. В даному випадку, мається на увазі можливість отримання шатунной шийки необхідної довжини як такої. При підвищенні товщини бойка понад 50% від довжини шатунной шийки, можливо сильне відхилення її довжини в готовому виробі, що є виробничим браком і не підлягає виправленню [70, 71].

Також при використанні бойка товщиною 8 мм та при вдавлюванні його на глибину менше 50% від діаметра заготовки, у повздовжньому напрямку виглядає більш раціональним, ніж при використанні бойка товщиною 12 мм. Це викликано тим, що при вдавлювання бойка товщиною 12 мм відбувається дуже сильна течія металу в повздовжньому напрямку, викликана більшим об’ємом металу який

деформується. Це призводить до значного викривлення заготовки у напрямку, протилежному руху верхнього інструмента, що є не бажаним при подальшому куванні шатунної шийки колінчастого валу.

Для того, щоб більш детально проаналізувати формозміну металу при вдавлюванні тонкого бойка, необхідно розглянути формозміну заготовки та її геометричних параметрів (рис. 2.6) у чисельному вигляді. Ці дані були занесені в таблиці в абсолютних та відносних величинах.

Таблиця 2.1 – Величина відносного поширення заготовки (ΔD) при використанні бойків різної товщини

Товщина бойка	4 мм				8 мм				12 мм			
Глибина вдавлювання	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм
ΔD	0,04	0,63	4,58	7,29	0,23	2,3	5,57	8,56	0,82	3,52	7,34	9,64
$\Delta D/D_{заг}$	0,01	0,02	0,11	0,18	0,005	0,06	0,14	0,21	0,02	0,09	0,18	0,24

Таблиця 2.2 – Довжина зони контакту верхнього деформуючого інструменту та заготовки ($l_{кв}$)

Товщина бойка	4 мм				8 мм				12 мм			
Глибина вдавлювання	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм
$l_{кв}$, мм	22,4	36,8	45,2	47,9	19,6	34,9	44,0	47,2	17,2	31,9	41,2	47,2
$l_{кв}/D_{заг}$	0,56	0,92	1,13	1,19	0,49	0,87	1,1	1,17	0,43	0,79	1,03	1,17

Таблиця 2.3 - Довжина зони контакту заготовки та нижнього деформуючого інструменту ($l_{кн}$)

Товщина бойка	4 мм				8 мм				12 мм			
Глибина вдавлювання	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм
$l_{кн}$, мм	5,18	9,41	13,2	19,4	9,21	12,6	21,7	28,5	9,51	17,1	27,3	38,9
$l_{кн}/D_{заг}$	0,12	0,23	0,32	0,48	0,23	0,31	0,54	0,71	0,23	0,42	0,68	0,97

Для опису форми бічної поверхні зразка в зоні деформації було прийнято розглянути величини h’ та h” (рис. 2.6). Відношення цих величин описує розташування частини бічної поверхні заготовки у поперечному перерізі в зоні деформації з найбільшим поширенням металу у просторі між деформуючими інструментами.

Також для більш повного аналізу було прийнято рішення проаналізувати додаткову глибину вдавлювання, яка дорівнює 4 мм. Однак це не дало бажаного результату. Так як при цій глибині вдавлювання формозміна металу є незначною, і вимірювані величини є незначними, у порівнянні із результатами при вдавлюванні на більшу глибину. Крім цього, вдавлювання бойка на глибину 4 мм є не раціональним з точки зору технологічності такої операції. Це викликано тим, що заготовка майже не деформується і об’єм металу, який можна було би заощадити, є не помітним у масштабах виробництва.

Таблиця 2.4 – Величини h’ та h”, та фактор форми бічної поверхні зразка в зоні деформації (h’/h”)

Товщина бойка	4 мм				8 мм				12 мм			
Глибина вдавлювання	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм
h', мм	14,6	8,73	1,01	1,08	15,2	9,8	4,12	2,9	15,3	11,0	6,03	4,13
h'', мм	21,4	19,3	18,9	10,9	20,8	18,2	15,9	9,1	20,6	16,9	13,9	7,86
h'/h''	0,68	0,45	0,05	0,09	0,73	0,53	0,25	0,3	0,74	0,65	0,43	0,52

Таблиця 2.5 – Величина ефективного діаметру коліна H

Товщина бойка	4 мм				8 мм				12 мм			
Глибина вдавлювання	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм	4 мм	12 мм	20 мм	28 мм
H, мм	37,2	34,0	32,5	31,6	36,9	32,5	29,8	28,4	36,5	31,7	28,6	26,7
$H/D_{заг}$	0,93	0,85	0,81	0,78	0,92	0,81	0,7	0,71	0,91	0,79	0,71	0,66

Це дозволило лише визначити інтервал раціональних глибин вдавлювання бойка в заготовку. Цей інтервал дорівнює 12..28 мм, або у відносній величині 0,3..0,7 від діаметра заготовки.

На рисунках 2.14-2.18 зображено графічні залежності зміни геометричних розмірів заготовки при використанні бойків різної товщини та при різних глибинах вдавлювання деформуючого інструмента в заготовку.

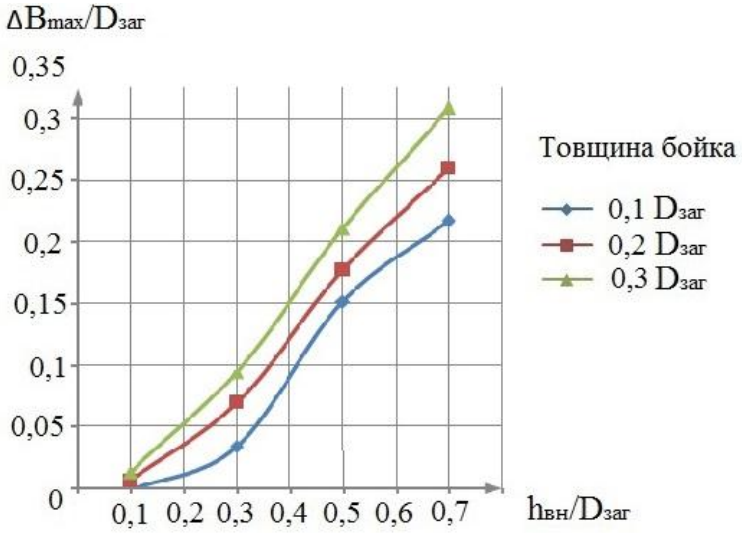


Рисунок 2.14 – Графічна залежність величини поширення заготовки від глибини вдавлювання для визначеного інтервалу товщини бойків

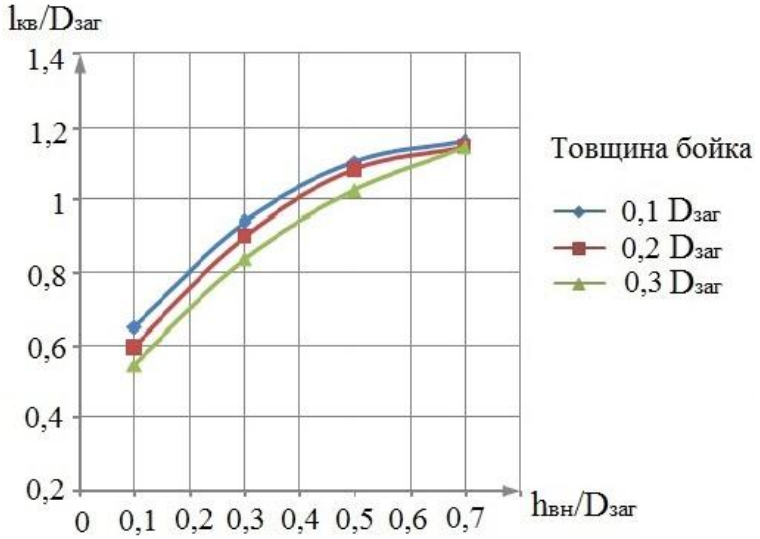


Рисунок 2.15 – Графічна залежність довжини зони контакту заготовки з верхнім деформуючим інструментом від глибини вдавлювання для визначеного інтервалу товщини бойків

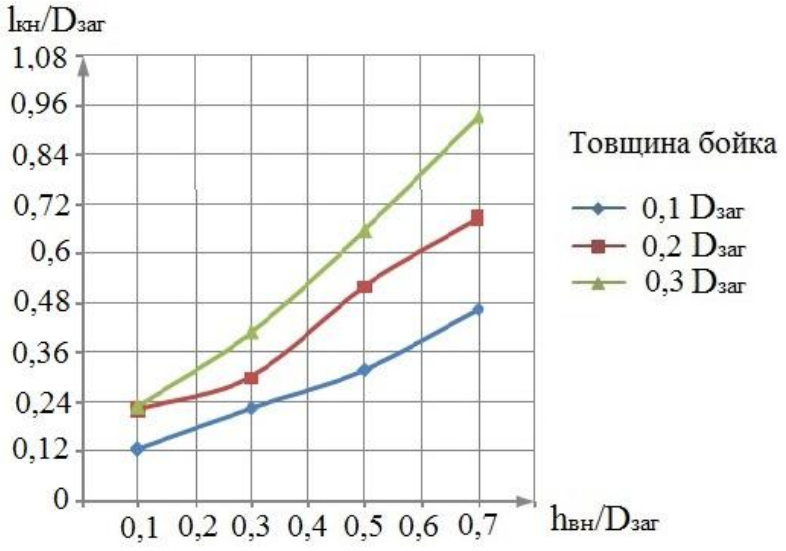


Рисунок 2.16 – Графічна залежність довжини зони контакту заготовки з нижнім деформуючим інструментом від глибини вдавлювання для визначеного інтервалу товщини бойків

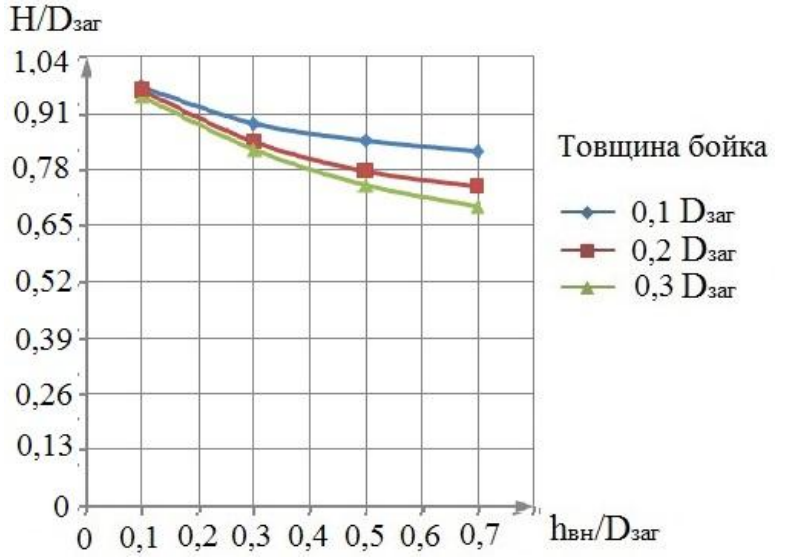


Рисунок 2.17 – Графічна залежність зміни величини ефективного діаметра коліна від глибини вдавлювання для визначеного інтервалу товщини бойків

Як бачимо, на рисунках 2.14, 2.16 та 2.17 залежності мають майже лінійний характер, що свідчить про те, що вимірювані геометричні розміри заготовки збільшуються пропорційно збільшенню глибини вдавлювання деформуючого інструменту, для кожної товщини бойка.

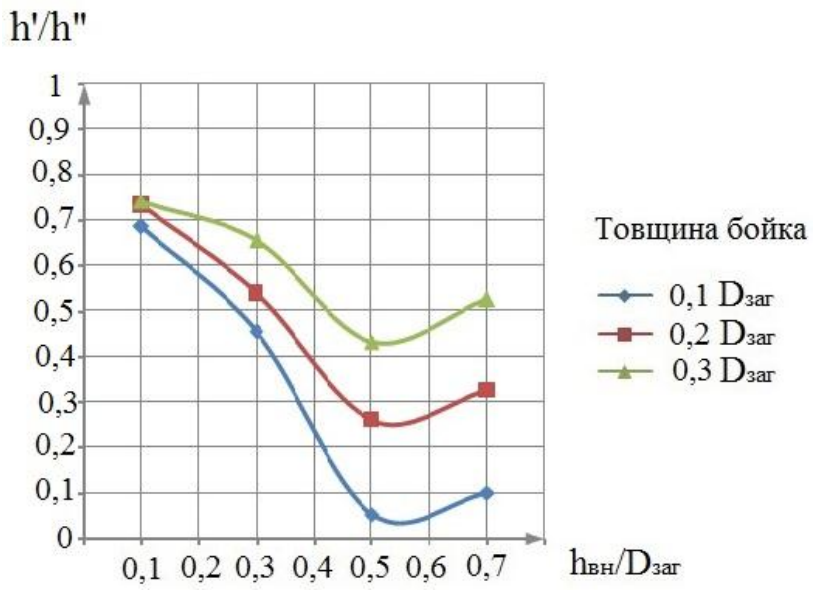


Рисунок 2.18 – Графічна залежність величини фактора форми бічної поверхні заготовки (h’/h”) в зоні деформації від глибини вдавлювання для визначеного інтервалу товщини бойків

На рисунку 2.15 видно, що графічні залежності мають нелінійний характер. Так як вимірювана в даному випадку величина є довжина контакту верхнього інструмента та заготовки – то можна зробити висновок, що найбільш впливовими факторами, які впливають на не лінійність залежностей, є умова тертя на контакті та швидкість руху деформуючого інструменту. Так, наприклад, ця залежність може прийняти лінійний характер, якщо під час деформації застосовувати мастила, а також збільшити швидкість руху деформуючого інструмента.

Зображена на рисунку 2.18 графічна залежність зміни фактора форми бічної поверхні є нелінійною. У випадку вдавлювання бойка товщиною 4 мм спостерігається зменшення цієї величини майже до нуля, що є дуже небажаним явищем з практичної точки зору, а саме складності приведення поперечного перерізу шатунної шийки до форми кола, а також утворення дефектів, таких як заков або затиснення при подальшому куванні. Таким чином, більш бажаним є значення фактора форми бічної поверхні, яке наближене до 1, як у випадку звичайного осаджування у пласких бойках.

Далі необхідно розглянути другий етап кування поковки колінчастого валу. Другий етап кування поковки складається з послідовного обтискання шатунної шийки парою тонких бойків з кантуванням заготовки на 90°, 45° та 15° для придання їй у поперечному перерізі форми кола. Після вдавлювання тонкого бойка, шатунну шийку відковують за допомогою пари тонких бойків, при цьому об’єм металу в зоні деформації подовжується у повздовжньому напрямку. При цьому важливим є встановлення залежності впливу товщини інструменту та глибини його вдавлювання на величину подовження шатунної шийки при куванні. Це є важливим, тому що при розрахунку технологічних переходів необхідно брати до уваги саме цей параметр як основний. Якщо при розрахунку технологічних переходів буде вибрано деформуючий інструмент більшої, ніж необхідно, товщини – то шатунна шийка колінчастого валу після кування отримає більше подовження і, відповідно, буде більшої довжини, ніж довжина шатунної шийки готового виробу. Це є безповоротнім браком, який неможливо усунути якими би то не було операціями кування.

На рисунку 2.19 зображено схематичний вид поковки після кування шатунної шийки парою тонких бойків. Пунктирною лінією на рис. 2.19 зображено колінчастий вал, який необхідно отримати в результаті всього технологічного процесу.

На даному етапі кування, як бачимо на рисунку 2.19, поковка колінчастого валу ще не є повністю готовою, та ще необхідно отримати опорні шийки колінчастого валу.

Однак вже на даному етапі необхідно проаналізувати формозміну металу та визначити залежності впливу геометричних параметрів інструменту та глибини вдавлювання на форму отримуваної шатунної шийки колінчастого валу, та на співвідношення основних геометричних розмірів коліна валу (висоти (діаметру) коліна, діаметру шатунної шийки, довжини шатунної шийки).

На рисунку 2.20 зображено загальний вигляд поковки колінчастого валу після відковування шатунної шийки парою тонких бойків. В даному випадку

використовувалися бойки товщиною 8 мм (0,2 $D_{заг}$) та глибина вдавлювання дорівнювала 20 мм (0,5 $D_{заг}$).

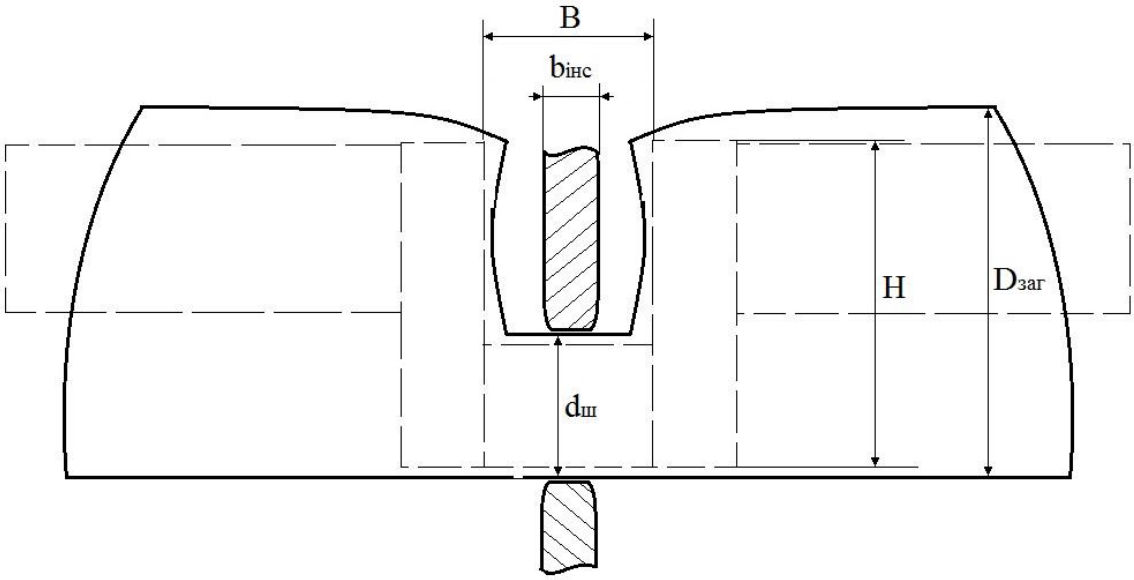


Рисунок 2.19 – Схематичне зображення поковки з шатунною шийкою отриманою куванням (вид збоку)

Основними геометричними параметрами в даному випадку(рис. 2.19) є:

$b_{інс}$ – товщина інструменту;

B – довжина шатунної шийки готової деталі;

H – ефективна висота коліна валу;

$D_{заг}$ – діаметр заготовки;

$d_ш$ – діаметр шатунної шийки.

Як бачимо, шатунна шийка колінчастого валу прийняла форму кола у поперечному перерізі (рис. 2.20 в), а також подовжилася у повздовжньому перерізі на деяку величину. Для того, щоб визначити вплив товщини інструменту та глибини вдавлювання на подовження шатунної шийки в процесі деформації, а також на співвідношення геометричних розмірів коліна валу, було проведене моделювання процесу згідно із планом експерименту.

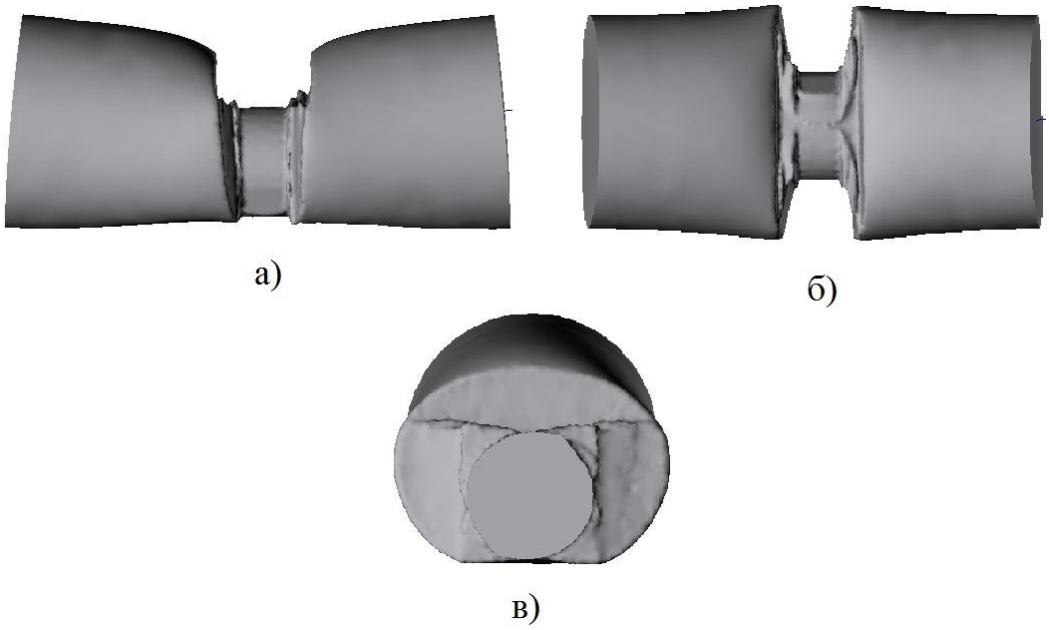


Рисунок 2.20 – Загальний вигляд поковки колінчастого валу після відковування шатунної шийки.

а) – вид збоку; б) – вид зверху; в) – вигляд у перерізі шатунної шийки

Кожна заготовка підлягала вдавлюванню бойка та подальшому куванню. При цьому застосовувалася наступна схема кантувань, яка описана далі. Після вдавлювання бойка в заготовку, вона кантувалася на 90°, після чого обтискалася (рис. 2.21 а, б). Далі заготовку знову кантують на 90° та обтискають для вирівнювання напливів металу, тобто до первинної величини вдавлювання бойка (рис. 2.21 в). Після цього заготовку кантують на 90° та знову обтискають, але вже збільшивши ступінь обтиснення. Це поступове збільшення ступені обтиснення робиться для того, щоб уникнути через мірного бочкоутворення металу в об’ємі шатунної шийки. Ці напливи металу утворюються по аналогії з осаджуванням високих зразків (H/D > 2,5), і є шкідливим для якості поковок, так як збільшується вірогідність утворення заковів та складок в об’ємі шатунної шийки. Кантування на 90° та обтискання повторюються доти, доки шатунна шийка не прийме в перерізі форму квадрата. При досліджуваних ступенях деформації та товщині інструменту, для отримання в перерізі шатунної шийки квадрата, необхідно від двох до шести обтиснень з кантуваннями на 90°. Розміри сторін квадрата залежать від глибини вдавлювання бойка на першому етапі кування, і в даному випадку складають 12 мм,

20 мм та 28 мм. Після цього заготовку кантують на 45°, обтискають, кантують на 90° та знову обтискають, для того, щоб придати поперечному перерізу шатунної шийки форму восьмикутника. Далі шатунну шийку в перерізі доводять до форми кола (рис. 2.20 в) малими обтисненнями з кантуванням на 15° після кожного обтиснення. Для утворення кола в перерізі необхідно мінімум 10 обтиснень. Більша кількість обтиснень є не раціональною з точки зору витрат енергії.

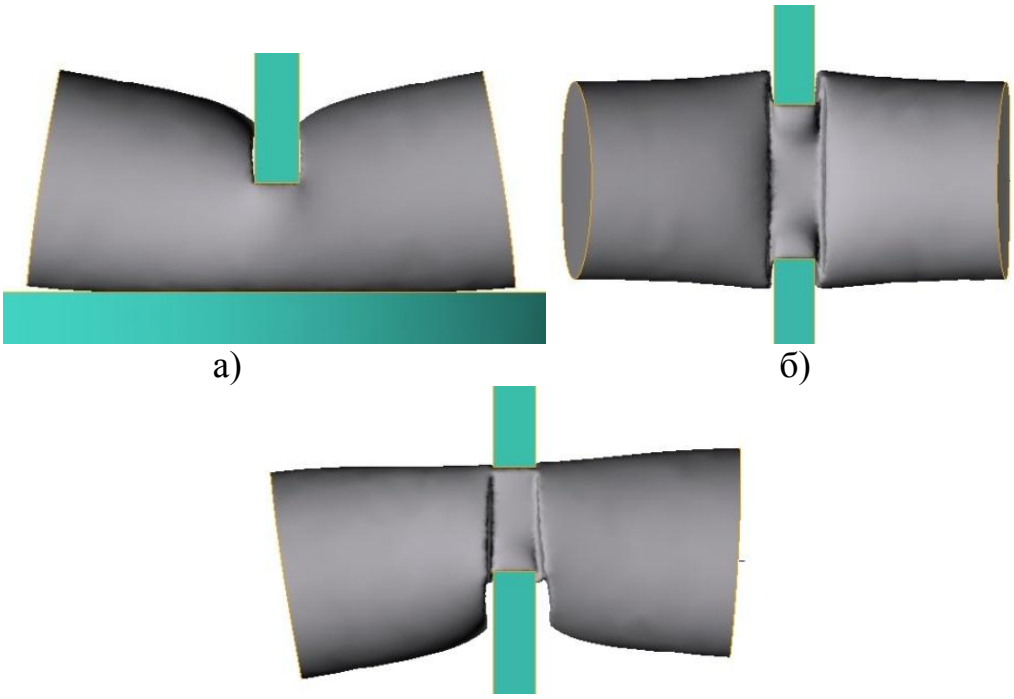


Рисунок 2.21 – Процес деформації заготовки тонкими бойками при отриманні шатунної шийки колінчастого валу вільним куванням

Таким чином отримано шатунну шийку колінчастого валу, однак при цьому необхідно визначити, які типорозміри коліна можливо отримати за розробленою схемою кування. Під типорозмірами коліна мається на увазі співвідношення довжини шатунної шийки та висоти коліна при заданому діаметрі шатунної шийки. Для цього необхідно розглянути поковку колінчастого валу, після етапу відковування шатунної шийки двома тонкими бойками, у повздовжньому перерізі. Для цього необхідно розглянути геометричні розміри поковки, які зображені на рисунку 2.19.

Після проведення другого етапу експерименту за допомогою комп’ютерного моделювання, було отримано результати, які були потім проаналізовані. Другий етап експерименту було проведено згідно із планом повного факторного експерименту, описаного раніше, однак після вдавлювання тонкого бойка слідувала обкатка шатунної шийки колінчастого валу вже парою тонких бойків за схемою кантувань, описаною раніше.

При цьому в отриману заготовку було вписано коліно валу для визначення необхідних розмірів (рис. 2.19) [72]. На рисунку 2.22 зображено коліно валу, вписане в отриману заготовку, при вдавлюванні бойка та обкочуванні шатунної шийки бойками з товщиною 4 мм для різних діаметрів шатунної шийки.

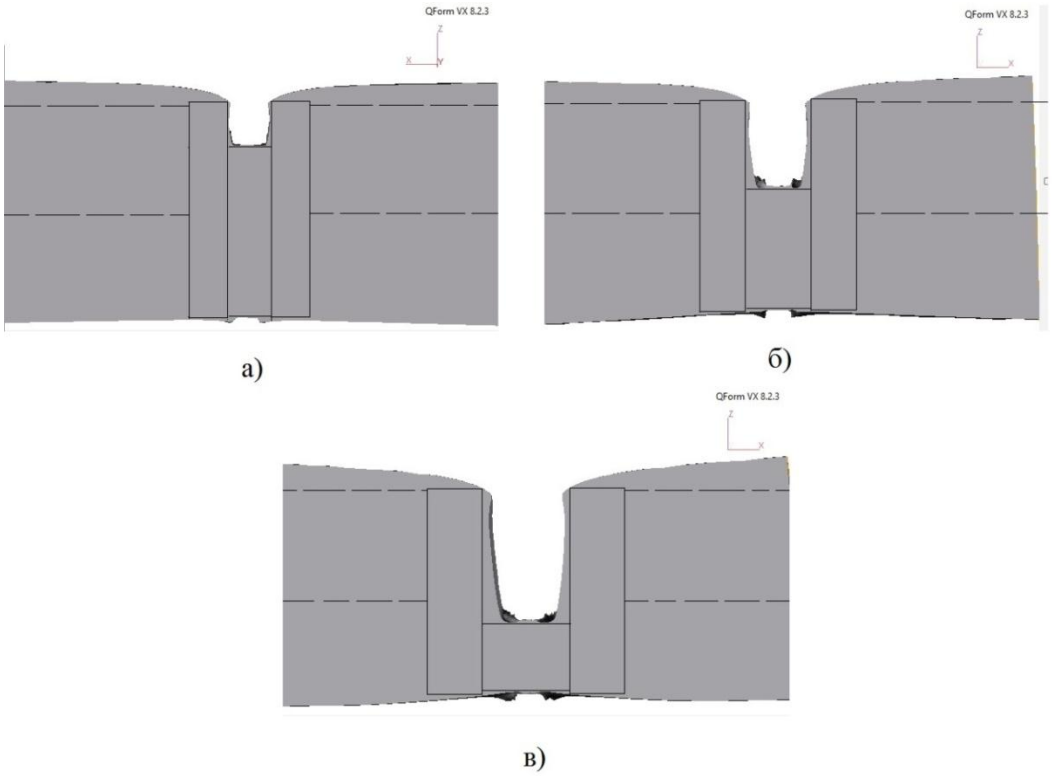


Рисунок 2.22 – Типорозміри коліна валу, які можливо отримати при застосуванні бойків з товщиною 4 мм

Як бачимо, довжина шатунної шийки контролюється саме глибиною вдавлювання бойка на першому етапі кування, яка в свою чергу залежить від необхідного діаметру шатунної шийки. Таким чином довжина шатунної шийки та її

діаметр є взаємно залежними величинами при застосуванні даного розробленого методу кування поковок колінчастих валів.

На рисунку 2.23 зображено коліно валу, вписане в отриману заготовку, при вдавлюванні бойка та обкочуванні шатунної шийки бойками з товщиною 8 мм для різних діаметрів шатунної шийки.

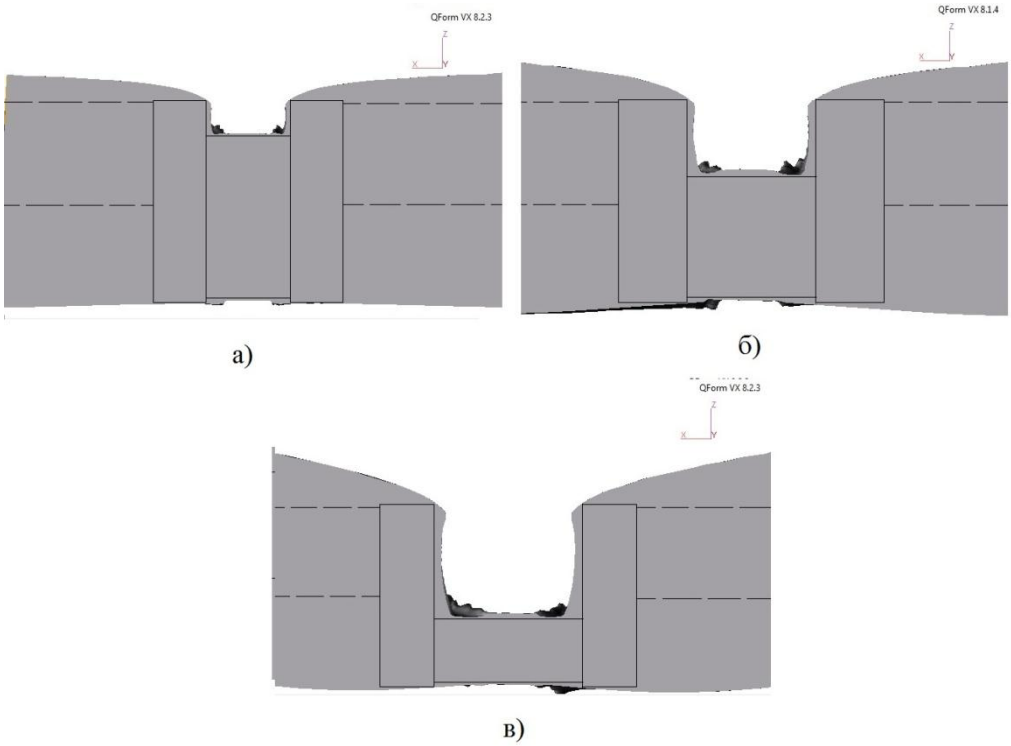
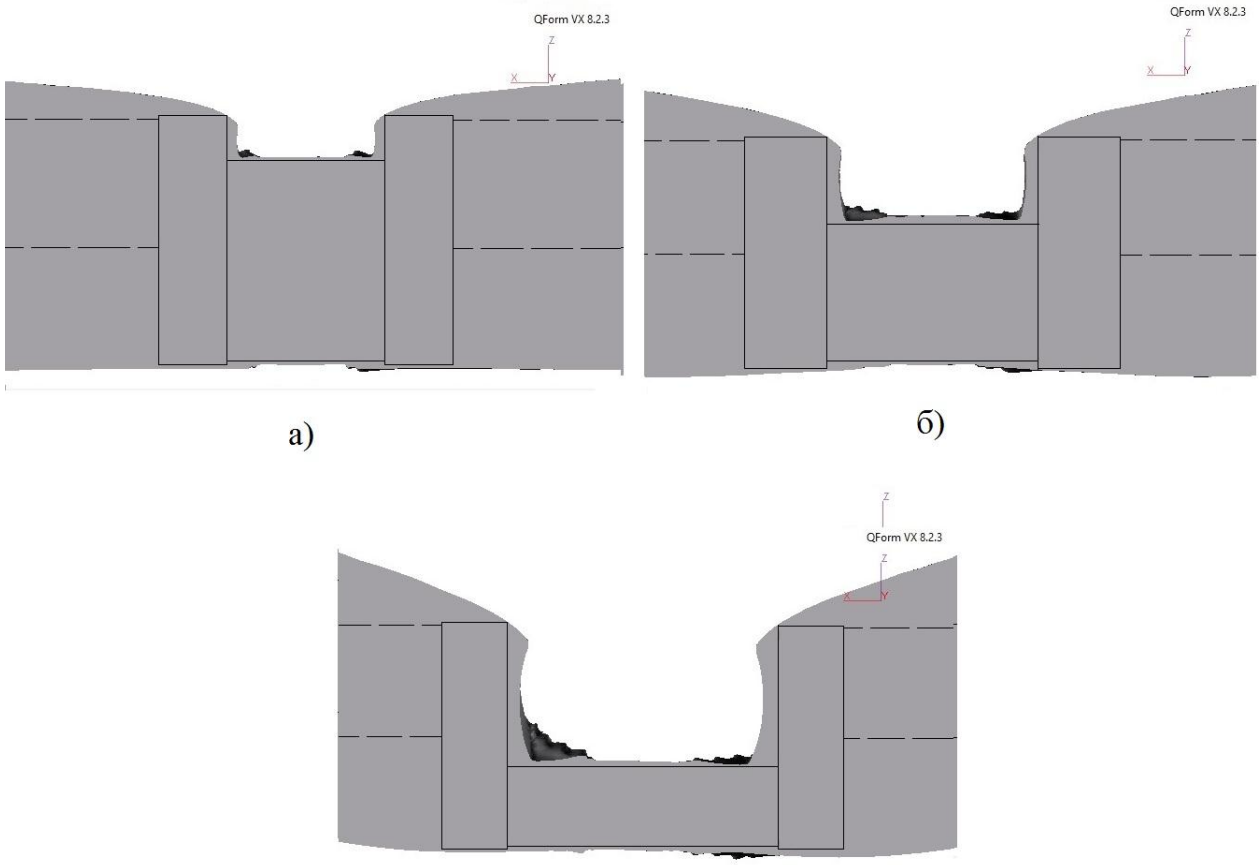


Рисунок 2.23 – Типорозміри коліна валу, які можливо отримати при застосуванні бойків з товщиною 8 мм

В даному випадку стає добре помітно зменшення ефективного діаметру коліна при збільшенні глибини вдавлювання, що видно з графіку на рисунку 2.17. При куванні шатунної шийки колінчастого валу бойками з товщиною 8 мм є помітно більшим її подовження. Таким чином, довжина шатунної шики при її діаметрі 20 мм, у два рази більша від товщини застосовуваних бойків, тобто 18 мм. А при діаметрі шатунної шийки 12 мм – довжина дорівнює 22 мм, тобто майже у три рази більше за товщину бойків.

На рисунку 2.24 зображено коліно валу, вписане в отриману заготовку, при вдавлюванні бойка та обкочуванні шатунної шийки бойками з товщиною 12 мм для різних діаметрів шатунної шийки.



а) б)

в)

Рисунок 2.24 – Типорозміри коліна валу, які можливо отримати при застосуванні бойків з товщиною 12 мм

Найбільш складною є формозміна заготовки при куванні шатунної шийки бойками з товщиною 12 мм. Ця складність виражена тим, що в даному випадку ми маємо справу з набагато більшим об’ємом металу, який деформується, ніж у випадку використання бойків товщиною 4 мм. Так як об’єм металу більший, то суттєво зростає викривлення заготовки в процесі деформації. Найбільш помітно це при діаметрі шатунної шийки 12 мм, коли має місце найбільша утяжина металу, та найбільший вигин кінців заготовки.

Далі розглянемо залежність впливу параметрів процесу на геометричні параметри заготовки.

Для цього було прийнято декілька величин у відносному вигляді. Величинами, які були прийняті у відносному вигляді є: діаметр шатунної шийки ($d_ш$), ефективний діаметр коліна (H), довжина шатунної шийки (B), товщина інструменту ($b_{інс}$), глибина вдавлювання бойка в заготовку ($h_{вд}$). Таким чином, було отримано графічні залежності, які зображено на рисунках 2.25 – 2.28, які показують зміну геометричних параметрів заготовки в залежності від товщини інструменту та глибини вдавлювання бойка.

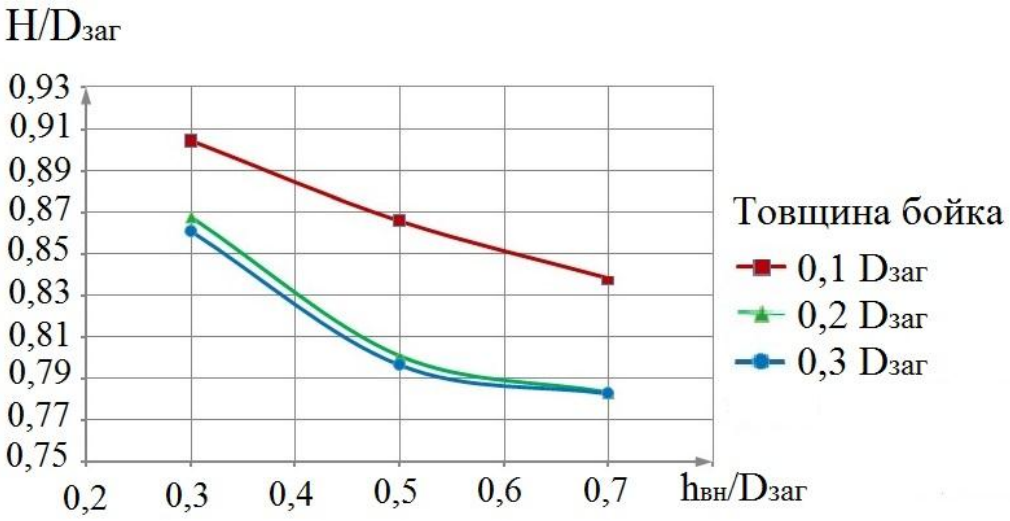


Рисунок 2.25 – Залежність величини утяжини (H) від параметрів кування

Таким чином, на рисунках 2.25 та 2.26 видно, що зміна ефективного діаметра коліна до діаметра заготовки, та діаметр шатунної шийки відносно до ефективного діаметра коліна змінюється майже лінійно для випадку використання бойків товщиною 4 мм при різних параметрах кування, а для бойків товщиною 8 мм та 12 мм спостерігається нелінійна залежність. Однак, також, можна помітити практично ідентичні криві, для випадку кування бойками 8 мм та 12 мм, а також практично однакові величини $H\backslash D_{заг}$ (рис. 2.25) та $d_ш\backslash H$ (рис. 2.26).

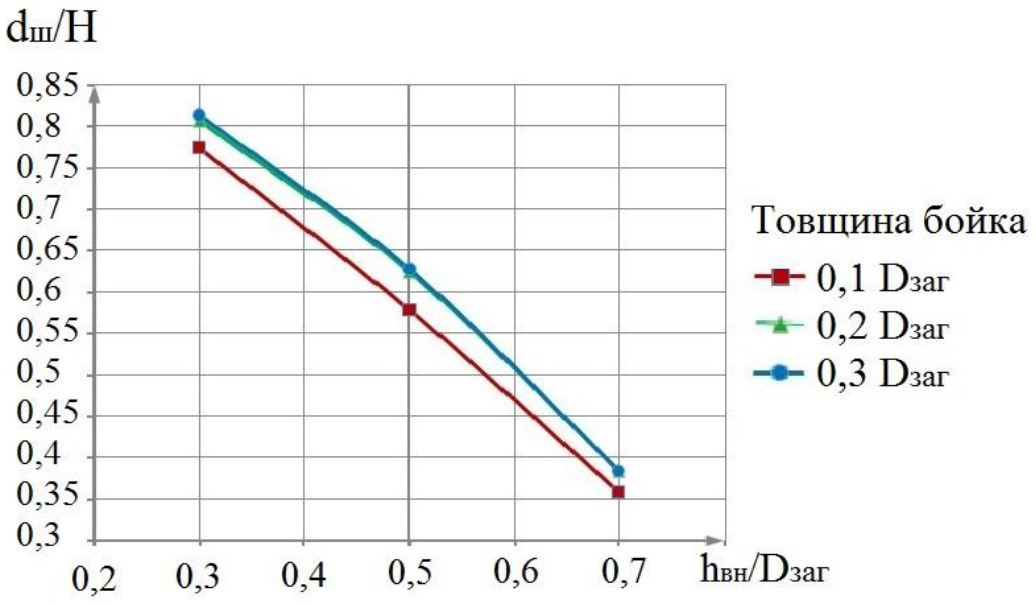


Рисунок 2.26 – Залежність співвідношення діаметру шатунної шийки ($d_ш$) та величини утяжини (H) від параметрів кування

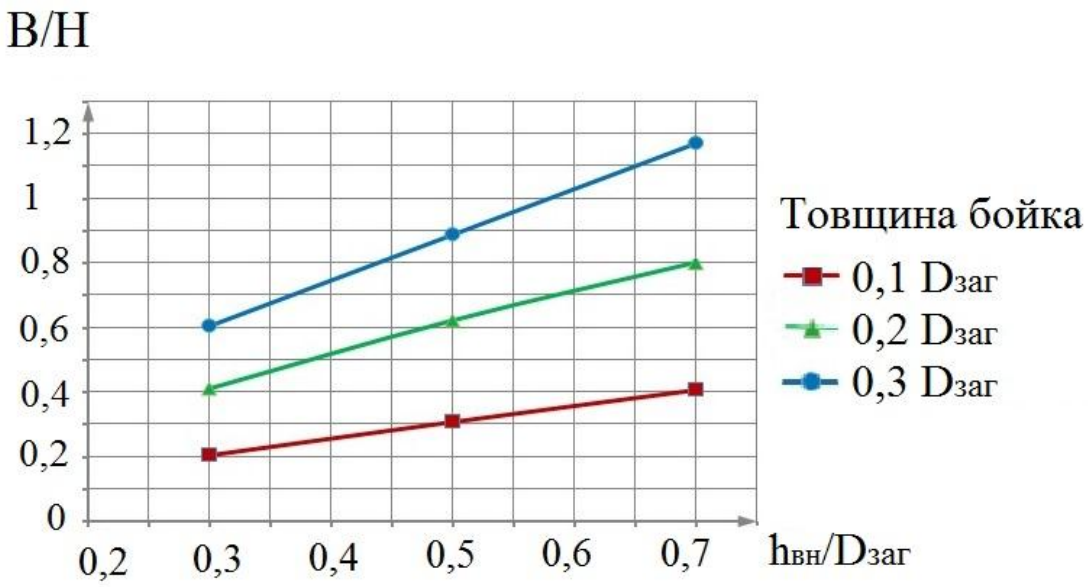


Рисунок 2.27 – Залежність співвідношення довжини шатунної шийки (B) та величини утяжини (H) від параметрів кування

З рисунку 2.27 видно, що типорозмір отримуваного коліна (B\H) змінюється лінійно для кожного випадку використання бойків з різною товщиною, однак кожен

випадок має характерну чисельну величину, яка значно відрізняється для кожного випадку кування.

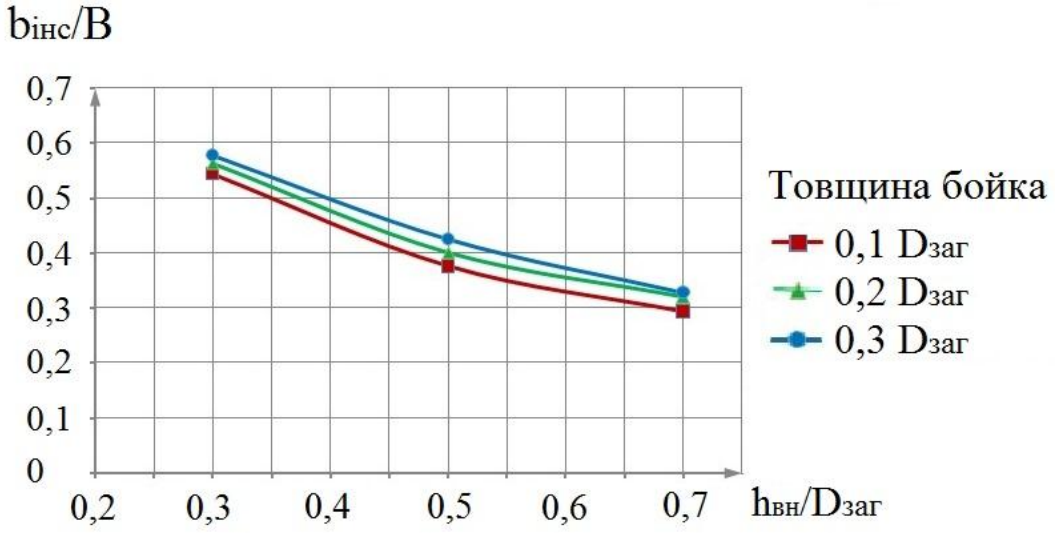


Рисунок 2.28 – Залежність співвідношення товщини деформуючого інструменту ($b_{інс}$) та довжини шатунної шийки (B) від параметрів кування

З графічної залежності на рисунку 2.28 видно зміну довжини шатунної шийки колінчастого валу в залежності від товщини використаного інструменту та глибини вдавлювання бойка. Таким чином, можна зробити висновок, що довжина шатунної шийки має майже лінійну залежність від глибини вдавлювання бойка і в незначній мірі залежить від товщини деформуючого інструменту [73].

Далі необхідно розглянути процес кування опорних шийок колінчастого валу, так як цей етап є невід’ємною частиною технологічного процесу виготовлення поковок колінчастих валів. Технологічна схема, описана в дисертаційній роботі, розглядає виготовлення колінчастого валу з опорними шийками рівної довжини, тому далі буде розглянуто формозміну, розподілення напружень та деформацій в коліні та одній опорній шийці, вважаючи що друга є симетричною. На рисунку 2.29 зображено формозміну металу в опорній шийці колінчастого валу. На рисунку 2.29 – 2.32, а) – це кування опорної шийки після отримання шатунної шийки, яку кували бойком з товщиною 0,1 $D_{заг}$; б) - це кування опорної шийки після отримання

шатунної шийки, яку кували бойком з товщиною 0,2 $D_{заг}$; в) - це кування опорної шийки після отримання шатунної шийки, яку кували бойком з товщиною 0,3 $D_{заг}$.

Обтискання опорної шийки, у всіх випадках використання тонких бойків для отримання шатунної шийки, не впливає на розмір висоти коліна. Це досягається застосуванням засічки металу. При застосуванні трикутної засічки, розміри якої було обрано по ГОСТ 11424-75 [74], частина металу зміщується, та не виникає затискань або заковів при переході від опорної шийки до щоки, при чому деформується об’єм металу, який було «відділено» засіканням, і це не викликає утяжини в частині коліна валу [75].

Далі розглянемо розподілення напружень, деформацій та температур у поковці колінчастого валу. На рисунку 2.30 зображено розподілення температур по повздовжньому перерізу поковки.

З аналізу розподілення деформацій в поковці, після кування опорної шийки колінчастого валу, можна зробити висновок, що деформації розподіляються безпосередньо в опорній шийці, та не поширюються у коліно валу. Таким чином, деформація, яку отримала шатунна шийка при деформуванні ніяк не буде змінюватися при куванні опорних шийок.

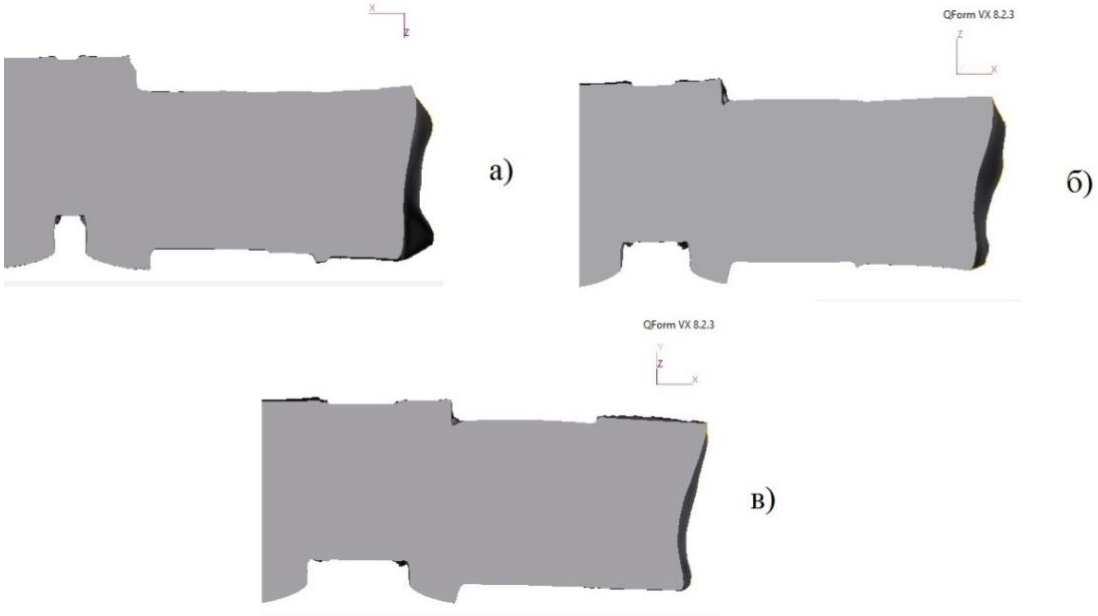


Рисунок 2.29 – Форма колінчастого валу з отриманою опорною шийкою.

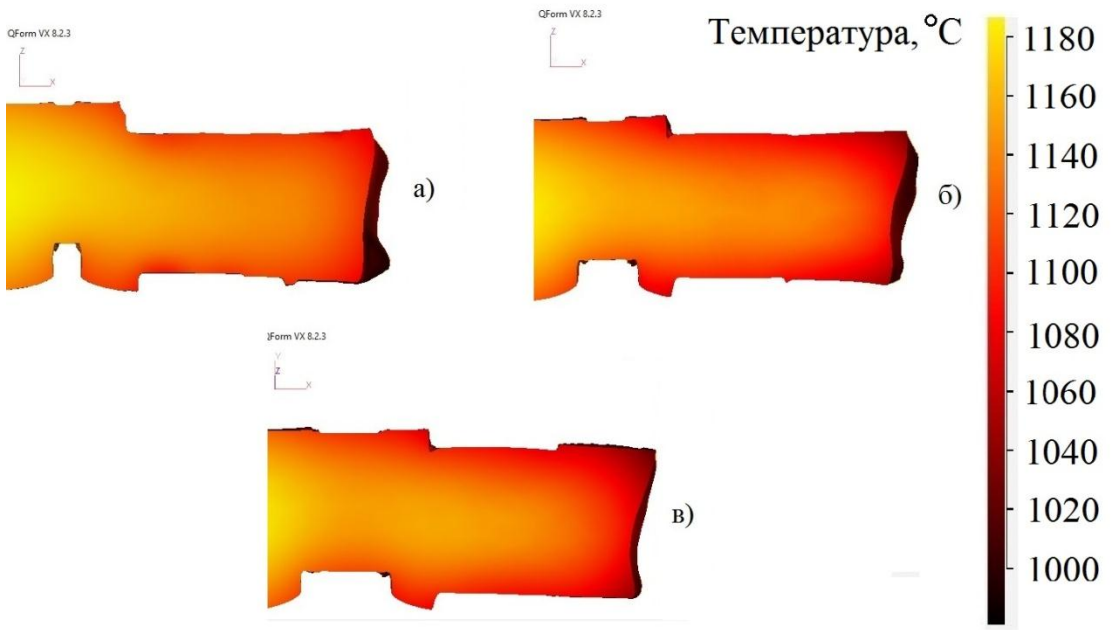


Рисунок 2.30 – Розподілення температур в поковці колінчастого валу

Температура в поковці розподілена рівномірно, без сильних перепадів на контакті заготовки та деформуючого інструменту. Це досягається підігрівом бойків. На рисунку 2.31 зображено розподілення напружень в перерізі поковки.

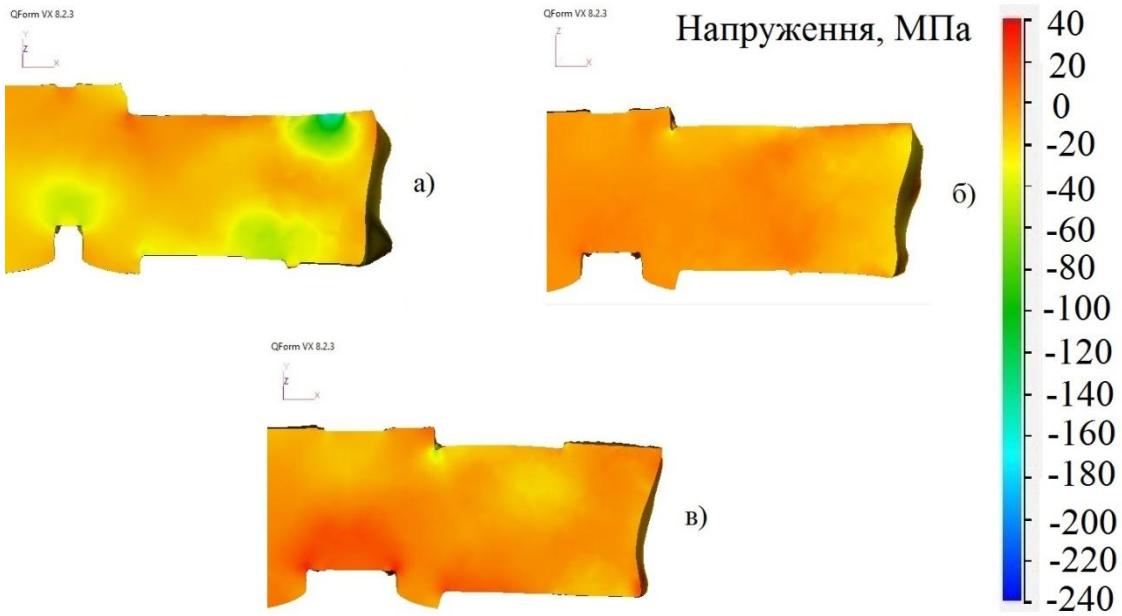


Рисунок 2.31 – Розподілення напружень в поковці колінчастого валу

На рисунку 2.32 зображено розподілення деформацій в поковці колінчастого валу.

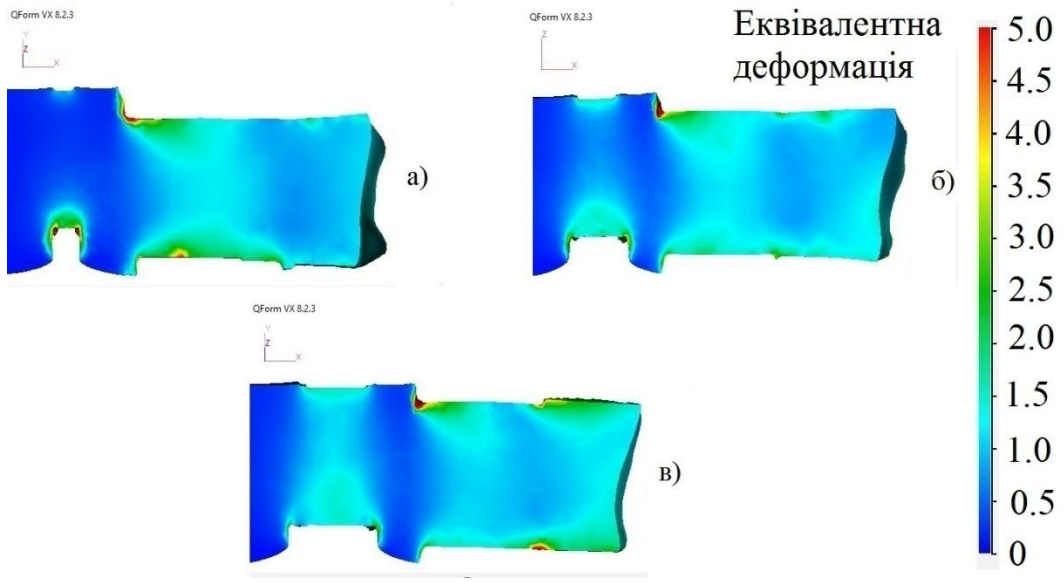


Рисунок 2.32 – Розподілення деформацій в поковці колінчастого валу

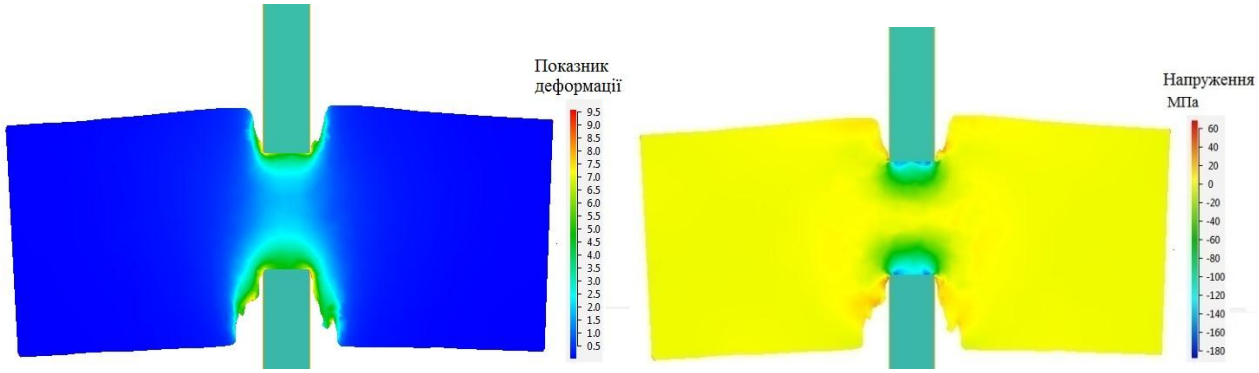
Це дає підстави вважати, що саме схема кування та геометричні параметри деформуючого інструменту формують кінцеву якість шатунної шийки. Тому далі розглянемо нерівномірність розподілення деформацій в шатунній шийці колінчастого валу, та зауважимо вплив параметрів кування на кінцеві показники проробки металу.

2.4 Аналіз результатів моделювання процесу кування поковок колінчастих валів

Аналіз результатів моделювання було вирішено провести в трьох перерізах по довжині шатунної шийки поковки колінчастого валу, так як в повздовжньому перерізі видно, що деформації та напруження розподіляються саме в шатунній шийці та не виходять за її межі. Типове розподілення напружень та деформацій при куванні шатунної шийки колінчастого валу показано на прикладі застосування бойка товщиною 8 мм при глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$, та зображено на рисунку 2.33.

Розглянемо розподілення деформацій, напружень та температур для різних параметрів кування, таких як товщина бойка та глибина вдавлювання. Також було вирішено розглянути розподілення деформацій в шатунній шийці по вдосконаленому методу визначення показника нерівномірності деформації. Аналіз

об’ємної нерівномірності деформації проводився для трьох перерізів по довжині, однак далі буде представлено лише один переріз (на середині довжини шатунної шийки) для кожної схеми кування, так як аналіз даних показав, що по довжині шийки рівномірність розподілення не змінюється.

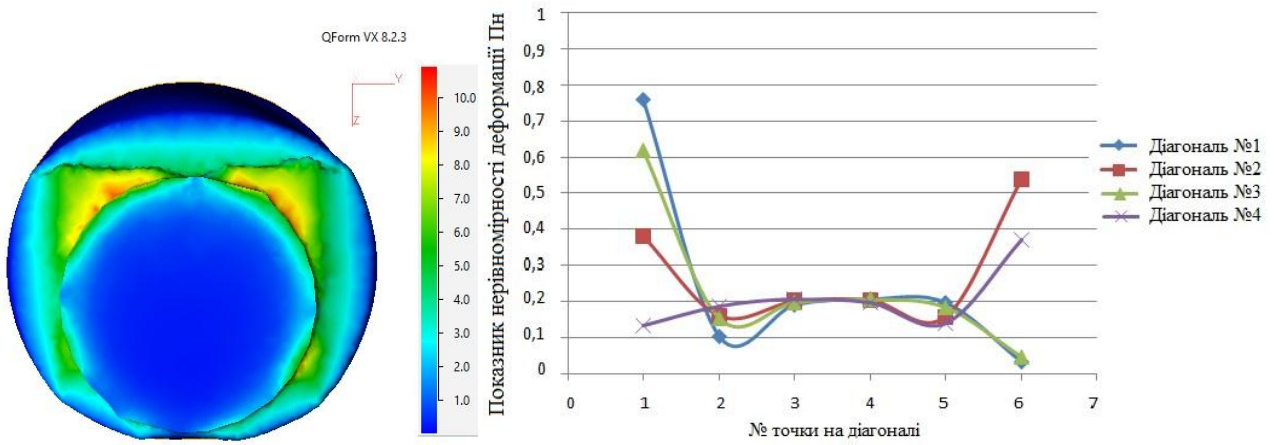


а) б)

Рисунок 2.33 – Типове розподілення напружень (б) та деформацій (а) в повздовжньому перерізі поковки

На основі отриманих при моделюванні даних було побудовано графіки нерівномірності розподілення деформацій в перерізі шатунної шийки поковки колінчастого валу [76]. На рисунку 2.34 зображено розподілення деформацій в перерізі шатунної шийки при застосуванні бойка товщиною 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.

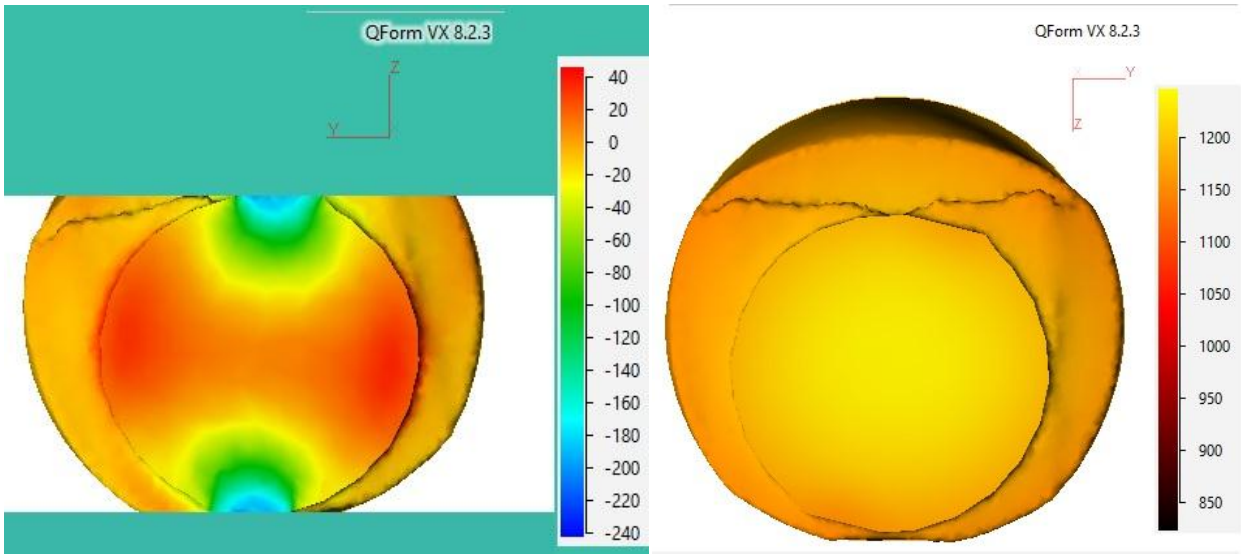
Як бачимо, в даному випадку внутрішні шари металу не отримують майже ніякої деформації, при тому поверхневі шари металу отримують найбільшу величину деформації. Така картина розподілення деформацій випливає з того, що товщина деформуючого інструменту, в даному випадку, є вирішальною, тобто при невеликому відношенні $b_{інс}\backslash D_{заг}$, яке дорівнює 0,1. Також впливовим чинником є глибина вдавлювання бойка, тобто чим менший ступінь деформації – тим слабкіше проникає деформація до внутрішніх шарів металу. У сукупності, фактори такої величини, а саме невелика товщина деформуючого інструменту та невеликий ступінь обтиснення, формують значну нерівномірність деформації (максимальне значення показника нерівномірності дорівнює 0,76).



а) б)

Рисунок 2.34 – Розподілення деформацій (а) та показник нерівномірності деформацій (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.

На рисунку 2.35 зображено розподілення напружень та температур в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.



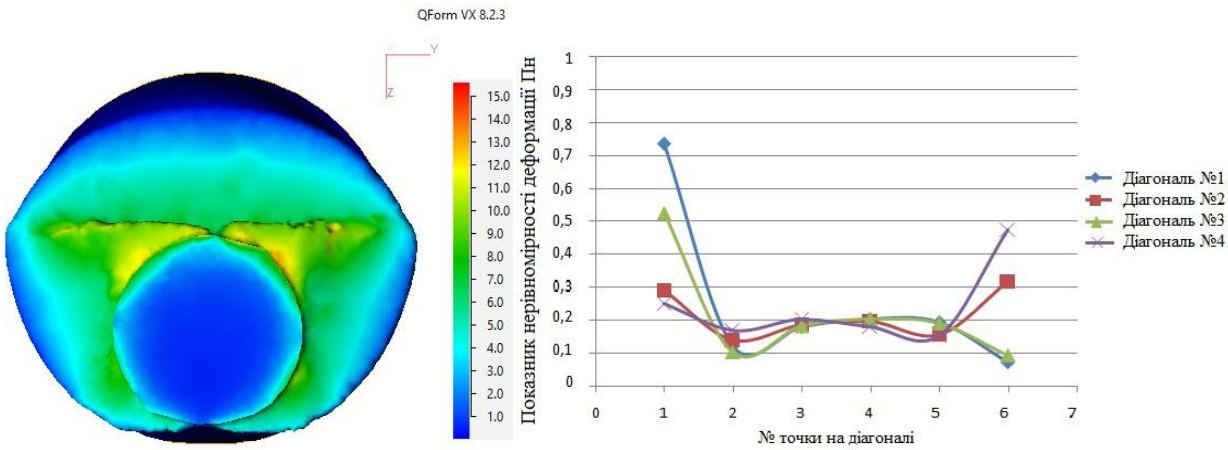
а) б)

Рисунок 2.35 – Розподілення напружень (а) та температур (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.

Температурне поле показує, що за даної схеми кування температура в шатунній шийці майже не змінюється. Напруження в перерізі показують типову, для

кування гладких валів, картину розподілення, тобто однаковий (симетричний) вплив верхнього та нижнього деформуючого інструменту, а на вільних поверхнях превалюють розтягуючи напруги.

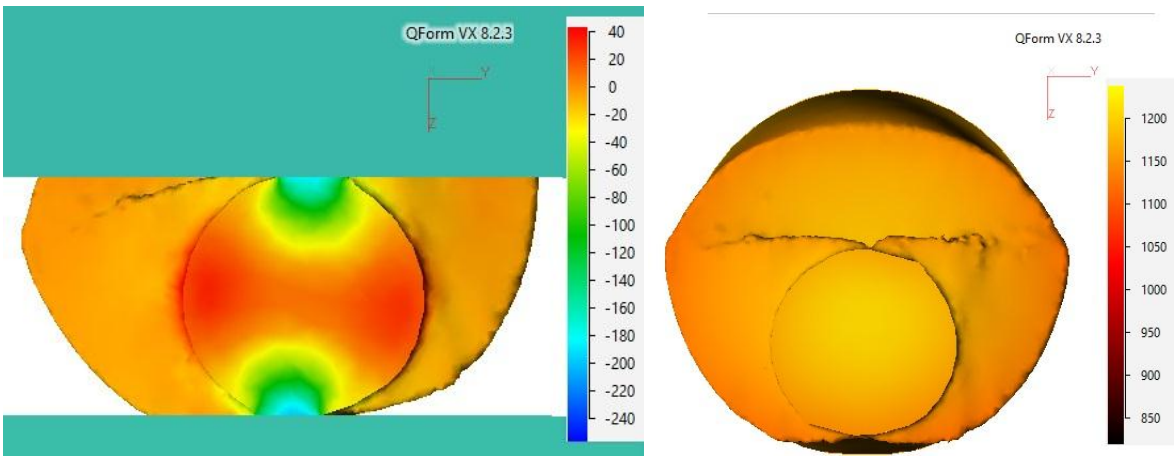
На рисунку 2.36 зображено розподілення деформацій при використанні бойка товщиною 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$. Як бачимо, якісно розподілення деформацій в об'ємі шатунної шийки не змінилося. Так само не змінилася величина показника нерівномірності деформації. Це також є наслідком застосування деформуючого інструменту з малою товщиною, тобто суттєвої деформації об'єму металу не відбувається, за рахунок малого об'єму в зоні деформації, а найбільш суттєву деформацію отримують зовнішні шари металу шатунної шийки.



а) б)

Рисунок 2.36 - Розподілення деформацій (а) та коефіцієнт нерівномірності деформацій (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$.

На рисунку 2.37 зображено розподілення напружень та температур в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$.

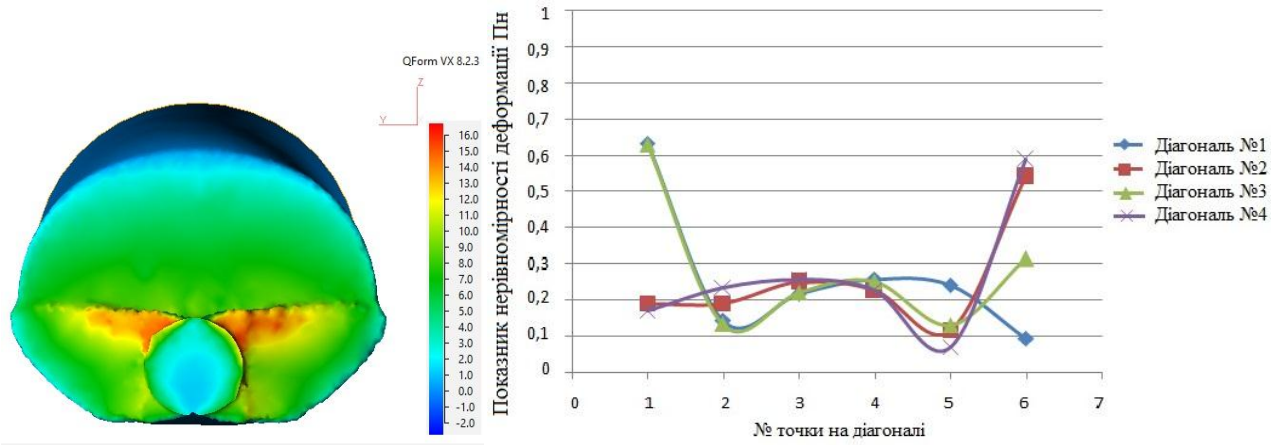


а) б)

Рисунок 2.37 – Розподілення напружень (а) та температур (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$.

Розподілення температур та напружень в середині шатунної шийки майже ідентично схемі кування при товщині бойка 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.

На рисунку 2.38 зображено розподілення деформацій при використанні бойка товщиною 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.



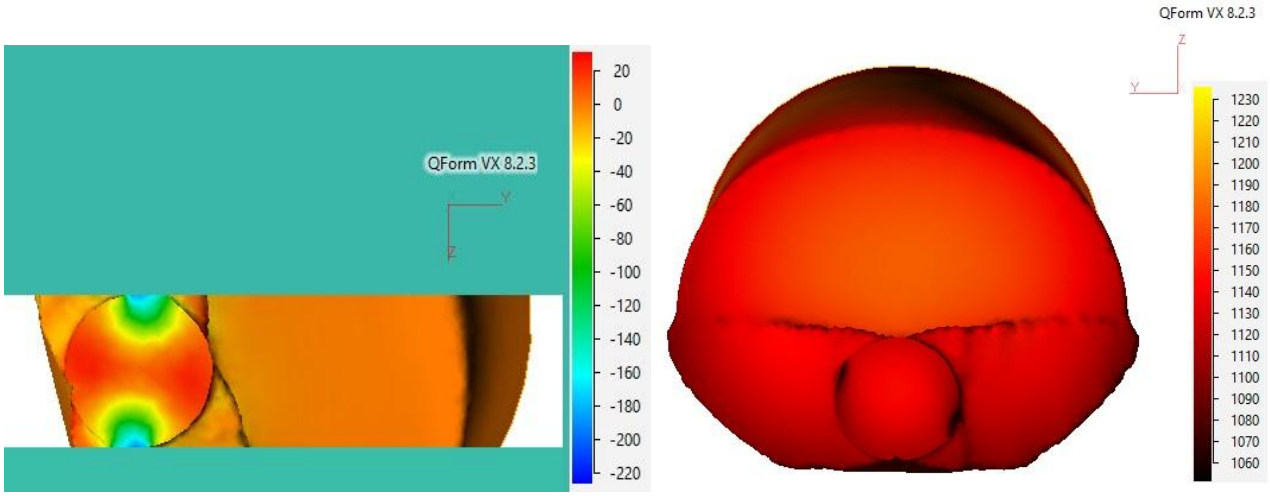
а) б)

Рисунок 2.38 - Розподілення деформацій (а) та коефіцієнт нерівномірності деформацій (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.

З рисунка 2.38 (б) видно, що коефіцієнт нерівномірності майже не змінився, хоча і було збільшено ступінь деформації. Таким чином можна зробити висновок

про те, що найбільш впливовим фактором в даному випадку є товщина бойка, яка створює деформований стан більш схожий з операцією відрубування або засічки металу, ніж з об’ємною деформацією. Так само зовнішні шари металу шатунної шийки отримують більшу деформацію, а внутрішні шари металу майже не деформуються, хоча мають помітно більші показники еквівалентної деформації.

На рисунку 2.39 зображено розподілення напружень та температур в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.



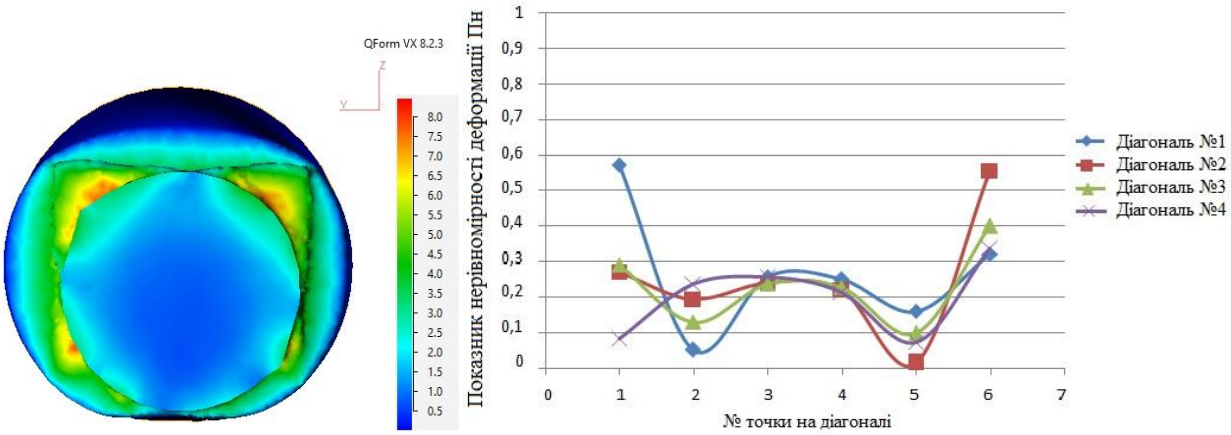
а) б)

Рисунок 2.39 – Розподілення напружень (а) та температур (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,1 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.

В даному випадку, температурне поле (рис. 2.39, б) показує зміну температури в осередку деформації, що пов’язано зі збільшенням кількості обтиснень для досягнення необхідної форми шатунної шийки.

Далі розглянемо розподілення деформацій, напружень та температур у випадку використання бойка товщиною 0,2 $D_{заг}$ та при різних глибинах вдавлювання. Збільшення товщини бойка в даному випадку вплинуло на глибину проникнення деформацій, що видно на (рис. 2.40, б). Однак величина деформації залишається незначною, тому якісно графік нерівномірності деформації виглядає як і графік на (рис. 2.38, б).

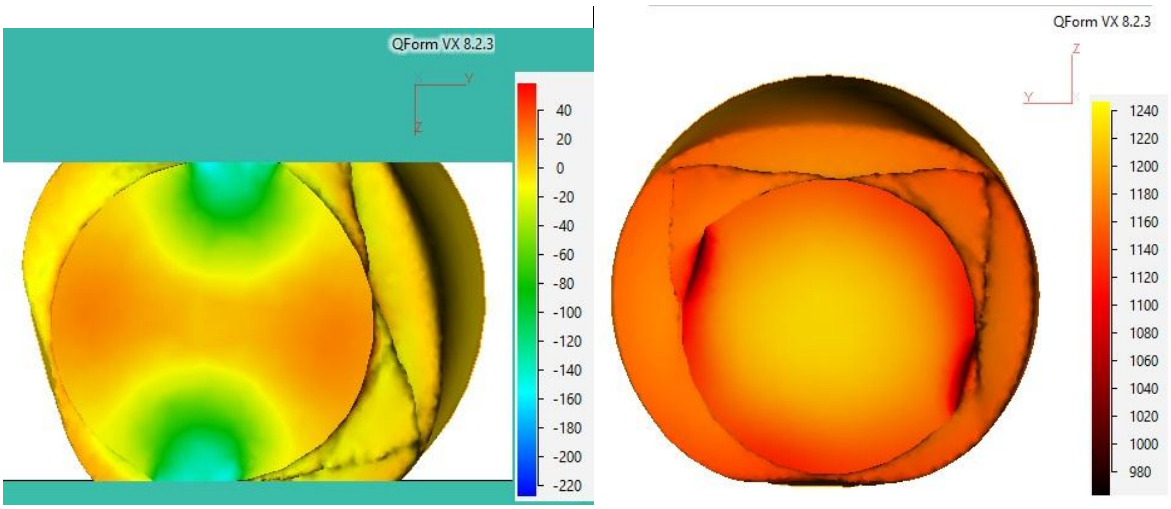
На рисунку 2.40 зображено розподілення деформацій при використанні бойка товщиною 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.



а) б)

Рисунок 2.40 - Розподілення деформацій (а) та показник нерівномірності деформацій (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.

На рисунку 2.41 зображено розподілення напружень та температур в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.



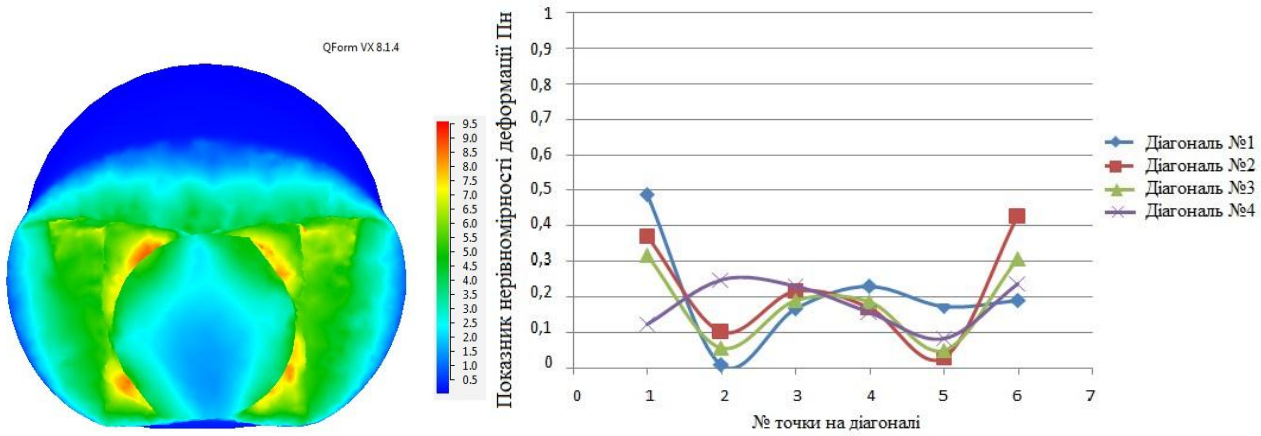
а) б)

Рисунок 2.41 – Розподілення напружень (а) та температур (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.

Збільшення товщини інструменту, у порівнянні із попередніми схемами, має вплив на температурне поле заготовки. На контакті заготовки та інструменту спостерігається значне зниження температури, що є шкідливим, однак для запобігання даного явища використовується підігрів бойків.

На рисунку 2.42 зображено розподілення деформацій при використанні бойка товщиною 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$.

З рисунку 2.42, б, видно, що розподілення деформацій стає більш рівномірним, а свідченням цього є те, що показник нерівномірності деформації не перевищує відмітки 0,5.

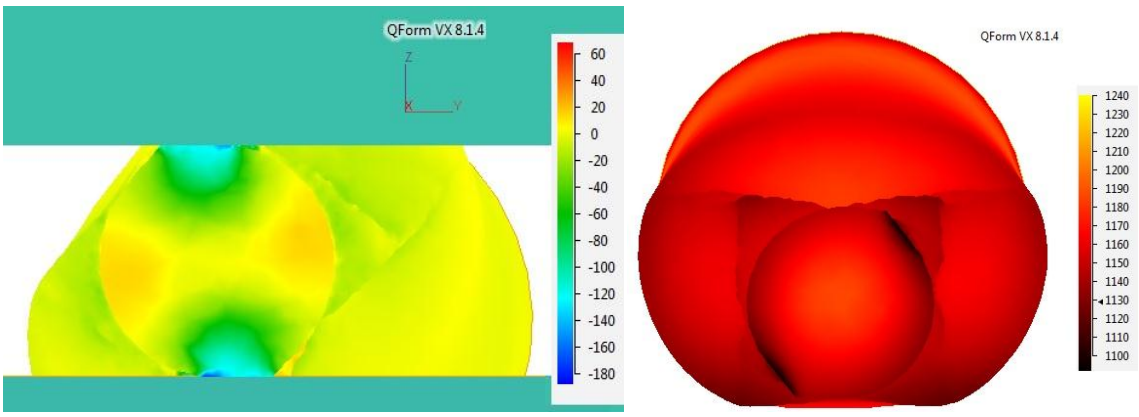


а) б)

Рисунок 2.42 - Розподілення деформацій (а) та коефіцієнт нерівномірності деформацій (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$.

На рисунку 2.43 зображено розподілення напружень та температур в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$.

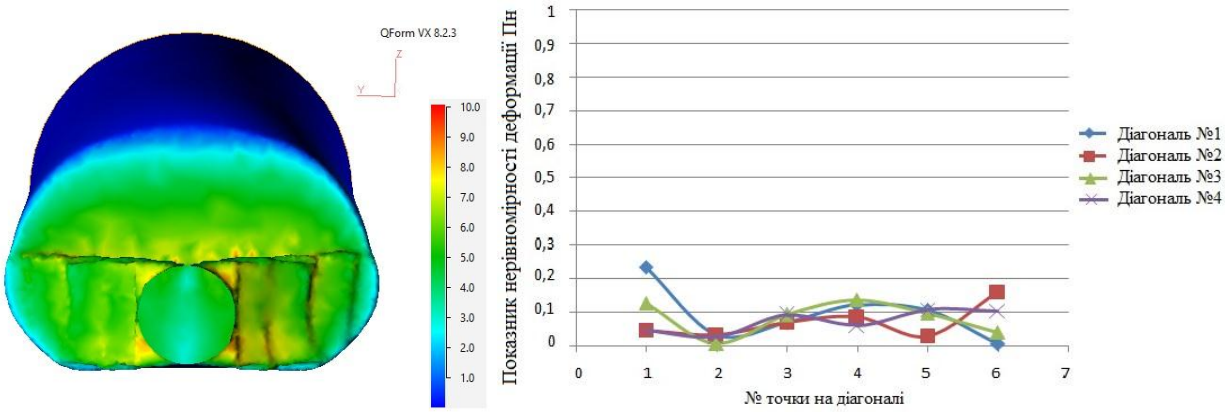
Розподілення напруг в даному випадку стає більш рівномірним, а на бічних поверхнях майже відсутні розтягуючи напруги. Температурне поле свідчить про те, що збільшення товщини інструменту, тобто зони контакту, а також збільшення кількості обтиснень суттєво впливає на температуру в об’ємі металу, яка знизилася майже на 100°С.



а) б)

Рисунок 2.43 – Розподілення напружень (а) та температур (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$.

На рисунку 2.44 зображено розподілення деформацій при використанні бойка товщиною 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.

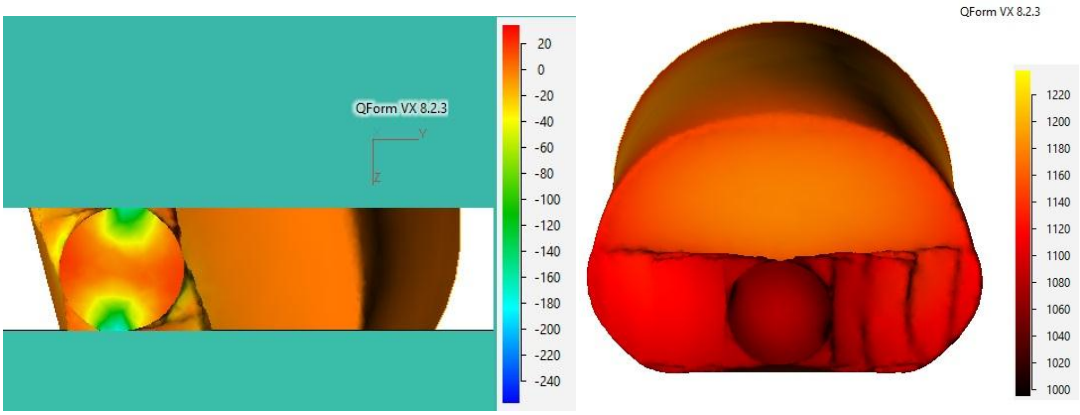


а) б)

Рисунок 2.44 - Розподілення деформацій (а) та коефіцієнт нерівномірності деформацій (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.

При даних параметрах кування помітно зросла рівномірність розподілення деформацій, що видно з графіку на (рис. 2.44, б). Найменші значення показника нерівномірності знаходяться у межах 0,24..0,25, що свідчить про досить добру проробку внутрішніх шарів металу у шатунній шийці.

На рисунку 2.45 зображено розподілення напружень та температур в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.



а) б)

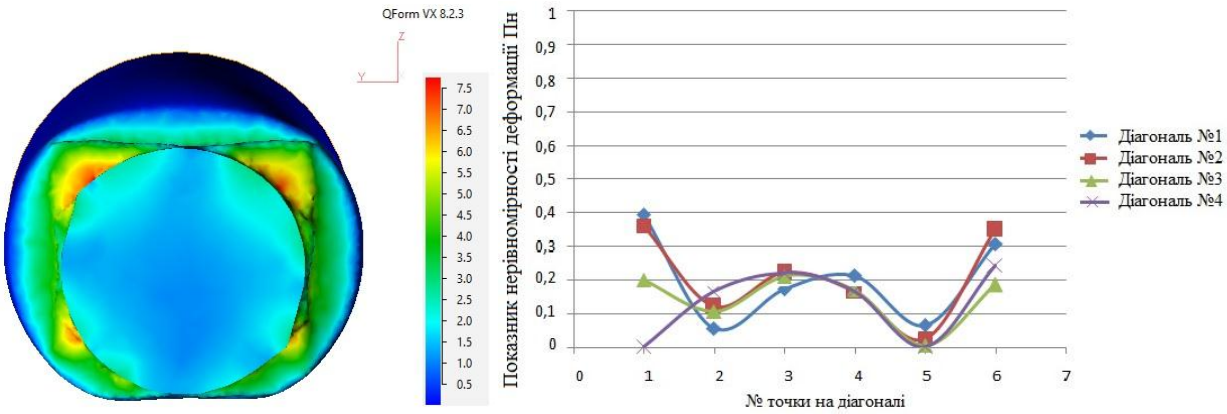
Рисунок 2.45 – Розподілення напружень (а) та температур (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,2 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.

Температура шатунної шийки, в даному випадку, знизилася майже до 1000°С, що є суттєвим, однак все одно не перевищує температурний інтервал для даної марки сталі.

Далі розглянемо розподілення деформацій, напружень та температур у випадку використання бойка товщиною 0,3 $D_{заг}$ та при різних глибинах вдавлювання. На рисунку 2.46 зображено розподілення деформацій при використанні бойка товщиною 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.

Навіть при незначній глибині вдавлювання, у порівнянні з випадками використання бойків з меншою товщиною, показник нерівномірності деформацій (рис. 2.46, б) має менші значення (не перевищує 0,4).

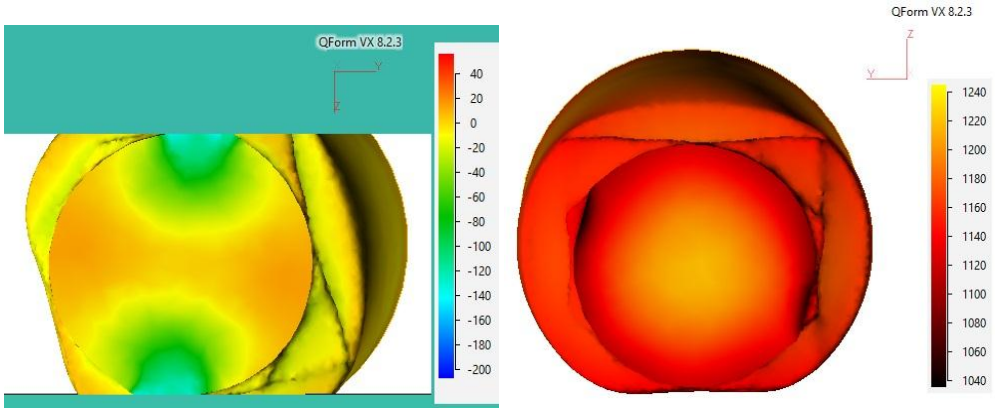
Це свідчить про більш інтенсивну проробку металу у внутрішніх шарах поковки у зв’язку зі збільшенням об’єму металу у зоні деформації. На рисунку 2.47 зображено розподілення напружень та температур в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.



а) б)

Рисунок 2.46 - Розподілення деформацій (а) та коефіцієнт нерівномірності деформацій (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.

Розподілення напруг в даному випадку майже не змінюється, у порівнянні із попередніми схемами кування. Температура в шатунній шийці має деяке зниження на поверхні, що пов’язано зі збільшенням площі контакту інструменту та заготовки.

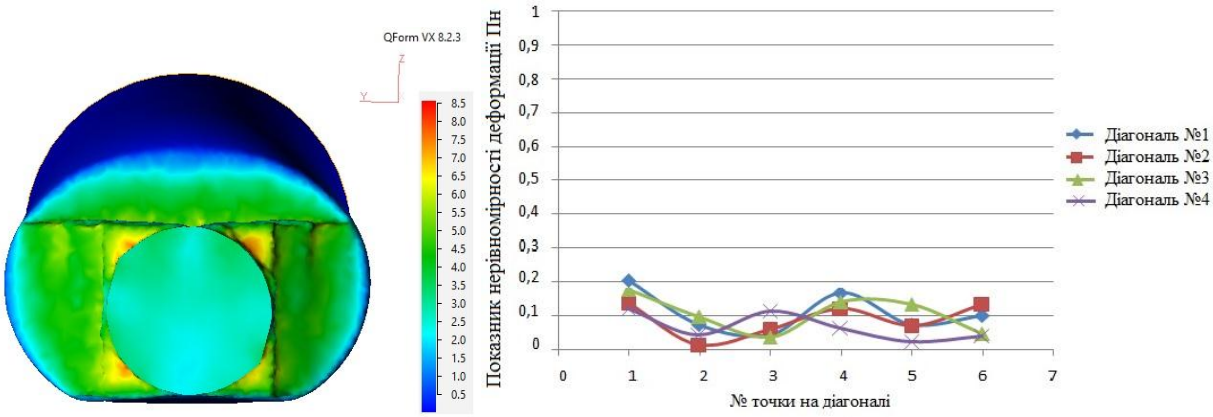


а) б)

Рисунок 2.47 – Розподілення напружень (а) та температур (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,3 $D_{заг}$.

На рисунку 2.48 зображено розподілення деформацій при використанні бойка товщиною 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$. При збільшенні обтиснення шатунної шийки з 0,3 $D_{заг}$ до 0,5 $D_{заг}$, також помітно зростає рівномірність розподілення деформацій в об’ємі металу шатунної шийки (рис. 2.48, б). Це свідчить

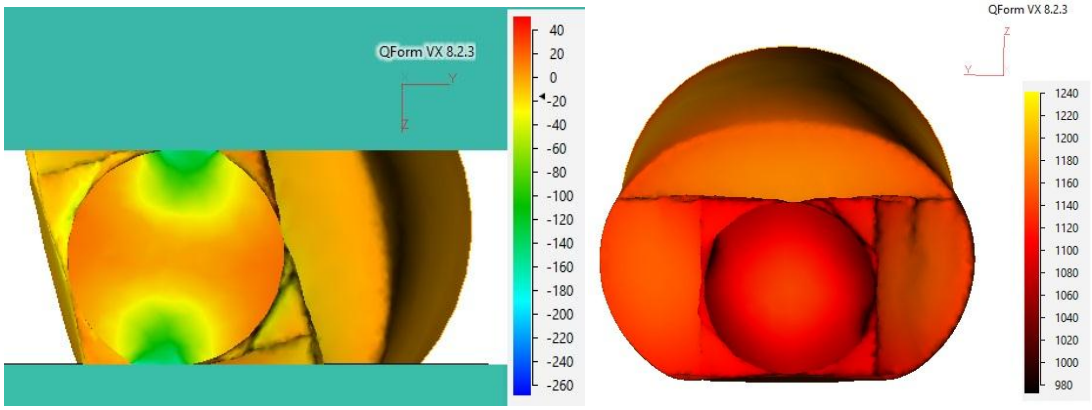
про те, що об’єм металу в шатунній шийці отримує більший ступінь проробки у внутрішніх шарах, за рахунок того, що збільшується вплив зовнішніх зон.



а) б)

Рисунок 2.48 - Розподілення деформацій (а) та коефіцієнт нерівномірності деформацій (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$.

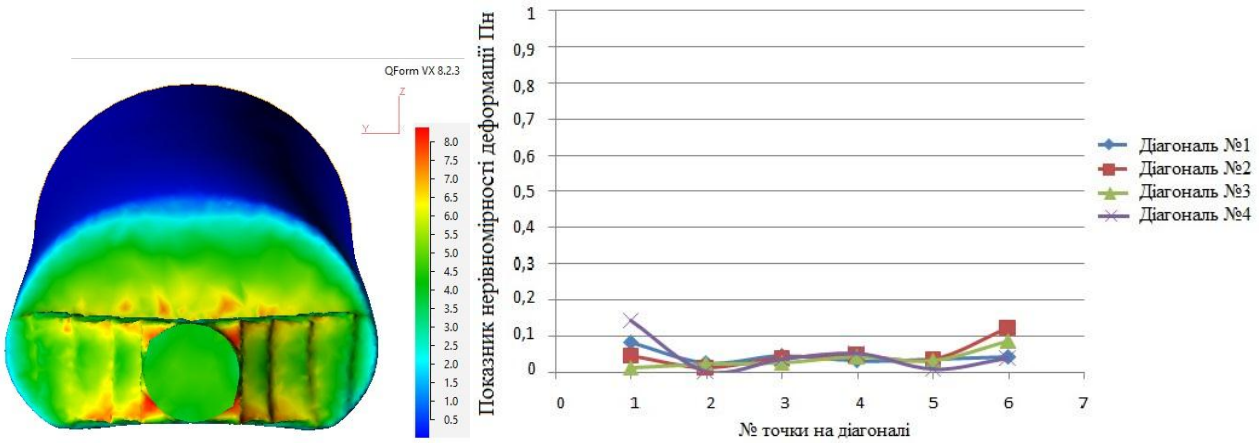
На рисунку 2.49 зображено розподілення напружень та температур в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$.



а) б)

Рисунок 2.49 – Розподілення напружень (а) та температур (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,5 $D_{заг}$.

На рисунку 2.50 зображено розподілення деформацій при використанні бойка товщиною 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.

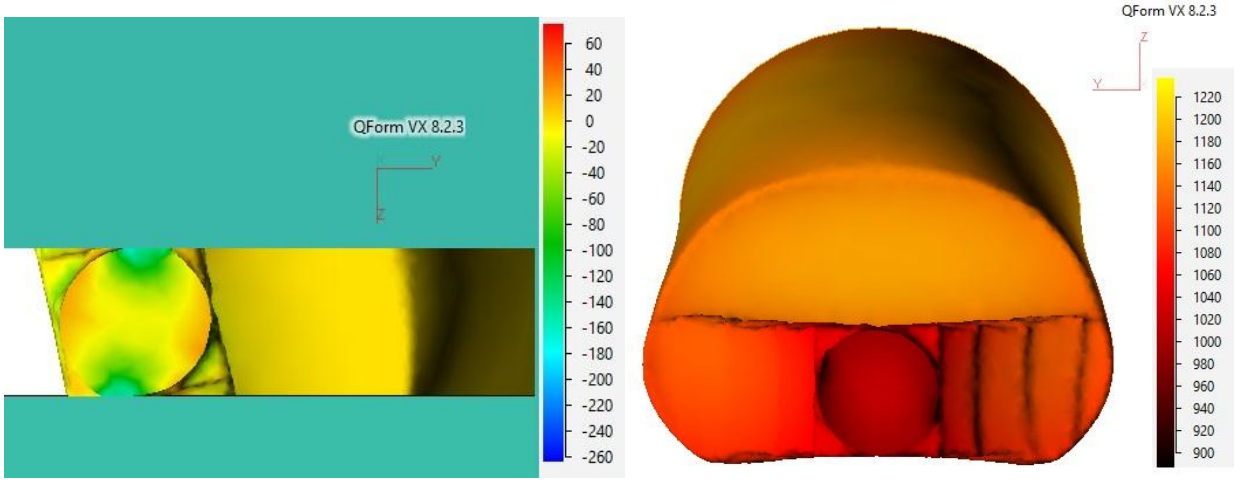


а) б)

Рисунок 2.50 - Розподілення деформацій (а) та коефіцієнт нерівномірності деформацій (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.

В даному випадку з графіку нерівномірності розподілення деформацій (рис. 2.50, б) видно, що при цих параметрах кування шатунна шийка отримує найбільшу рівномірність (мінімальні значення на рівні 0,14..0,15), у порівнянні з іншими схемами кування. Це викликано найбільш сильним обтисненням шатунної шийки при використанні бойків з найбільшою товщиною, серед усіх інших. З точки зору якості продукції, ці параметри кування могли би бути найбільш вдалими, так як шатунна шийка отримує найбільшу проробку, і як наслідок, має кращі показники механічних властивостей, у порівнянні з іншими частинами поковки. Однак це накладає додаткові проблеми, з точки зору подальшої термічної обробки, так як в об’ємі шатунної шийки, в даному випадку, превалюють зерна з меншим розміром, ніж у прилеглих щоках колінчастого валу, які майже не отримали ніякої деформації. Це значить, що необхідно підбирати температурний режим відмінний як для шатунної шийки, так і для щок колінчастого валу.

На рисунку 2.51 зображено розподілення напружень та температур в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.



а) б)

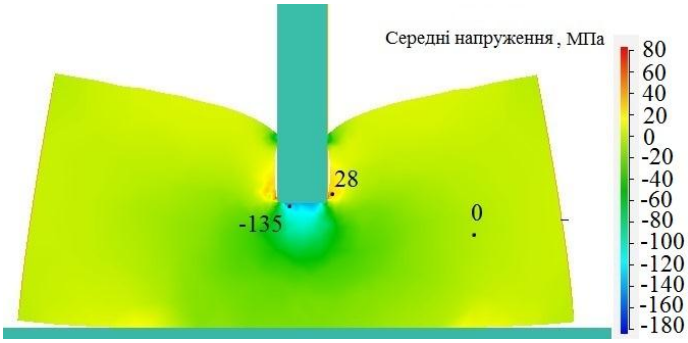
Рисунок 2.51 – Розподілення напружень (а) та температур (б) в перерізі шатунної шийки при товщині бойка 0,3 $D_{заг}$ та глибині вдавлювання 0,7 $D_{заг}$.

Розподілення напружень має схожу картину із попередніми схемами. А температурне поле вказує на те, що навіть при найбільшій товщині бойка та при найбільшій кількості обтиснень, температура в шатунній шийці не виходить за рамки температурного інтервалу кування. З цього можна зробити висновок про те, що усі розглянуті схеми кування можливо виконувати за один підігрів заготовки.

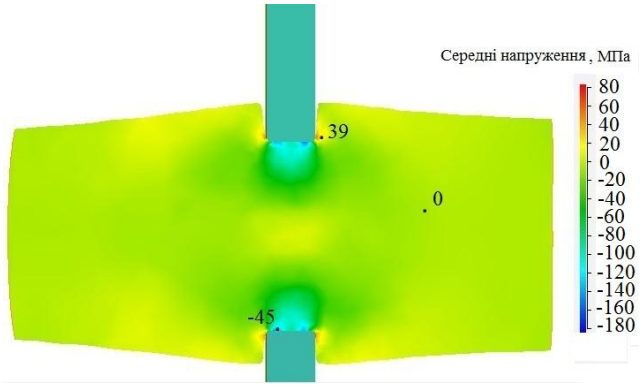
Таким чином, розглянувши усі схеми кування шатунної шийки колінчастого валу, можна зробити висновок, що найбільш раціональними схемами є схеми з використанням бойків з товщиною 0,1 $D_{заг}$, при всіх трьох глибинах вдавлювання бойка, а також схем з використанням бойків товщиною 0,2 $D_{заг}$, але лише при вдавлюванні бойка на 0,3..0,5 $D_{заг}$. Усі інші схеми, хоч і мають найменші показники нерівномірності деформації, є складнішими з точки зору формозміни.

Також, слід зауважити, що розроблена схема кантувань дозволяє отримувати поковки з мінімальним повздовжнім викривленням. Це стається за рахунок того, що при вдавлюванні бойка, в зоні контакту заготовки та верхнього деформуючого інструменту, виникають сильні стискаючі напруження (рис. 2.52, а), які свідчать про вигин заготовки в повздовжньому напрямку, в сторону верхнього бойка. А при послідуючому кантуванні на 90° та обтисненні заготовка випрямляється в повздовжньому напрямку. При розгляді напружень в вертикальному повздовжньому

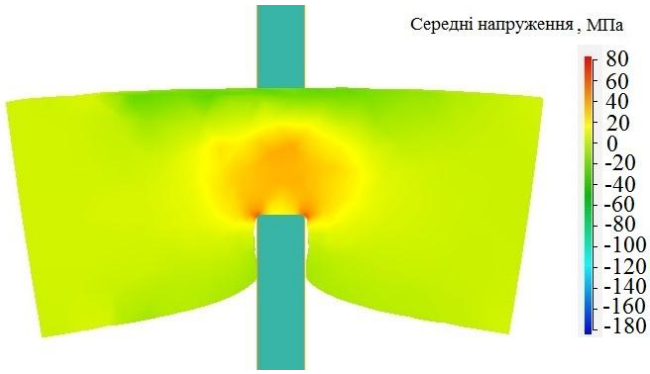
перерізі (рис. 2.52, б) це не помітно, видно лише симетричний вплив бойків, але в горизонтальному повздовжньому перерізі стають помітні розтягуючи напруги, в тому місці, де були стискаючі, які свідчать про вигин заготовки зворотному напрямку (рис. 2.52, в).



а)



б)



в)

Рисунок 2.52 – Розподілення напружень в повздовжніх перерізах заготовки

Таким чином, заготовка в кінці досліджуваного процесу кування є прямолінійною, а це свідчить про те, що розроблена схема кантувань є ефективною

2.5 Висновки до розділу 2

В даному розділі розглянуто технологічний процес виготовлення поковок колінчастих валів з отриманням шатунної шийки вільним куванням. Для початку, вдосконалено метод розрахунку коефіцієнта нерівномірності деформації, який в послідуючому застосовано для обробки даних комп'ютерного моделювання. Вдосконалення методу обчислення показника нерівномірності деформації здійснено шляхом урахування різниці між середнім значенням коефіцієнту нерівномірності по перерізу поковки та значеннями цього параметру у певних точках перерізу. Це дозволяє узгодити рівень оцінюваної нерівномірності деформації по перерізам з її кількісним вираженням, а також адекватно оцінювати величину нерівномірності та визначати раціональні режими деформування при куванні.

По результатам комп'ютерного моделювання було визначено раціональні параметри кування при вдавлюванні бойка та куванні шатунної шийки колінчастого валу. Для цього було проведено серію комп'ютерних моделювань процесу кування по визначенню формозміни металу при вдавлюванні бойка та визначенню раціональних розмірів інструменту для отримання шатунної шийки колінчастого валу. Для цього побудовано комп'ютерну модель для 12 дослідів по вдавлюванню бойка в заготовку, та 9 дослідів по куванню шатунної шийки колінчастого валу. При вдавлюванні бойка в заготовку було розглянуто формозміну металу та побудовано графічні залежності зміни основних геометричних параметрів заготовки від товщини бойка та глибини його вдавлювання. Також отримані результати комп'ютерного моделювання процесу кування шатунної шийки було проаналізовано, та на основі аналізу, побудовано графіки залежності. Графічні залежності відображають зміну геометричних параметрів заготовки, а також величини ефективного діаметру коліна від товщини деформуючого інструменту (в інтервалі 0,1..0,3 до діаметру заготовки) та ступеню одиничної обтиснення (в інтервалі 30..70%) при вільному куванні місць формування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів. Це дозволило призначати, при певній товщині деформуючого інструменту, рівень обтиснення для формування необхідного

діаметра шатунної шийки та щок валу в місці розташування коліна великогабаритного колінчастого валу.

Також розглянуто розподілення напружень, деформацій та температур при куванні шатунної шийки парою «тонких» бойків за розробленою схемою кантувань. Розглянуто поля розподілення напружень, та виявлено, що напружений стан майже однаковий для всіх схем кування, тобто має місце симетричний вплив деформуючого інструменту на заготовку. Однак при цьому, саме з розподілення напружень помітним є викривлення поковки при вдавлюванні бойка, а також її вигин у зворотному напрямку та отриманні в кінці процесу кування шатунної шийки прямолінійної поковки. Також оцінено поле розподілення температури в перерізі шатунної шийки, та визначено, що температура залежить від товщини бойка в більшій мірі, ніж від глибини його вдавлювання. Визначено, що для здійснення усіх операцій кування для отримання шатунної шийки колінчастого валу достатньо одного підігріву заготовки, про що свідчить дотримання температурного інтервалу кування для вибраної марки сталі. Розподілення деформацій в шатунній шийці оцінювалося в трьох перерізах по довжині, за допомогою вдосконаленого методу визначення показника нерівномірності деформації. Отримані дані свідчать про те, що більший вплив на рівномірність розподілення деформацій має товщина інструменту, а найбільш раціональними схемами кування при цьому є схеми з використанням бойків з товщиною 0,2 та 0,3 $D_{заг}$. За отриманими даними комп’ютерного моделювання можливе проектування технологічного процесу виготовлення колінчастих валів з отриманням шатунної шийки вільним куванням. Тому, при використанні деформуючого інструменту з відношенням товщини до діаметру заготовки в інтервалі 0,1..0,3, при багаторазових обтисненнях, теоретично, з використанням вдосконаленого методу визначення нерівномірності деформації металу, для певної довжини шатунної шийки визначено кількість обтиснень, кантувань та рівнів ступеню деформації. Це дозволяє обрати варіант схеми деформування з мінімальною нерівномірністю деформацій в місці формування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ ПРИ ФОРМУВАННІ КОЛІНА ВАЛУ ТОНКИМ ДЕФОРМУЮЧИМ ІНСТРУМЕНТОМ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ПОКОВОК КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ ВІЛЬНИМ КУВАННЯМ

3.1 Постановка задачі

Суть розробленого методу кування поковок колінчатих валів полягає у вдавлюванні вузького бойка в поковку, для вигину волокон, надання коліну форми наближеної до форми готового виробу, а так само зменшення об'єму металу, що витрачається на механічну обробку.

Даний метод також має свої плюси і мінуси. До мінусів даного способу можна віднести те, що після вдавлювання вузького бойка в поковку, відбувається її викривлення в напрямку протилежному напрямку прикладання деформуючої сили, внаслідок нерівномірного плину металу в осередку деформації, однак цей недолік зникає при подальшому куванні шатунної шийки і заготовка знову приймає прямолінійну форму. Однак великим плюсом даного методу можна вважати спрямований вигин волокон по формі готового виробу, що в деякій мірі позначиться на механічних характеристиках готового колінчастого валу, а так само допоможе уникнути перерізання волокон в процесі механічної обробки поковки. Крім цього, значно зросте і коефіцієнт використання металу, завдяки формуванні коліна вала за формою наближену до форми готового виробу, що дозволяє виключити повний напуск на коліно валу і, відповідно, знизити витрати металу при механічній обробці.

При складанні даного методу були розглянуті різні варіанти його виконання. Таким чином, з початку, було запропоновано впровадження бойка у вже відковану поковку колінчастого вала. Однак нерівномірний плин металу в зоні деформації і, як наслідок, викривлення поковки, навіть після фінальної правки, може змістити основну вісь колінчастого вала, що призведе до остаточного браку поковки, внаслідок не дотримання величини ексцентриситету. Також, цей варіант виконання процесу вдавлювання вузького бойка в поковку є не раціональним внаслідок неможливості правлення поковки, яка при виготовленні її протяжкою призведе до

ще більшої криволінійності поковки, а правка поковки з використанням осаджування просто не можлива з-за неможливості вертикального розташування поковки в підкладних кільцях.

Виходячи з вищесказаного, було запропоновано здійснювати вдавлювання вузького бойка в поковку до протягування опорних шийок, щоб уникнути браку поковки за недотримання величини ексцентриситету. При цьому правку здійснити методом протягування заготовки у вирізних бойках. Після чого протягнути опорні шийки валу для отримання необхідного ексцентриситету.

Крім описаних особливостей технологічного процесу вдавлювання вузького бойка в поковку колінчастого валу, так само існує декілька особливостей, пов'язаних з плином металу при деформації. В даному випадку можна привести аналогію з процесами осаджування і прошивання осаджених заготовок. Якщо розглядати процес вдавлювання вузького бойка як процес осаджування (що можна побачити при зображенні осередку деформації в поздовжньому перерізі заготовки), то в даному випадку така характеристика заготовки, як фактор форми, не працює. Це виражено тим, що плин металу в сторони обмежене прилеглими зонами і максимальні значення фактора форми для осаджування, рівні 2..2,5, можуть бути підвищені до значень, рівних 10 і більше при вдавлюванні вузького бойка в заготовку. Також значення співвідношення ширини впроваджуваного бойка до діаметру заготовки понад 1,5..2 не мають своєї практичної значущості, так як співвідношення відстані між щік колінчастого вала до висоти коліна передбачається менше одиниці, з міркувань міцності шатунної шийки колінчастого валу. Однак можливий варіант конструкції колінчастого валу з великою відстанню між щоками коліна за умови збільшення діаметра шатунної шийки. Але в даному випадку застосування методу вдавлювання вузького бойка є недоцільним, через занадто малі глибини вдавлювання і, як наслідок, незначного впливу даної операції на кінцеву якість колінчастого вала.

Як і при прошивці, при вдавлюванні вузького бойка в поковку існує декілька особливостей формозміни металу. Перше – це вигин поковки в напрямку протилежному напрямку прикладання сили деформуючим інструментом. Друге – це

утворення ухилів, як при прошивці на поверхні контакту пуансона і поковки, так і на поверхні контакту вузького бойка і щік поковки колінчастого вала. Основними параметрами, які впливають на дані особливості формозміни, є:

- тертя на контакті інструменту і заготовки;
- різна форма інструменту і заготовки.

Вплив показника тертя є незначним при певних умовах, як, наприклад, при значенні співвідношення ширини впроваджуваного бойка до діаметру заготовки менше 1 і ще більше зменшується з наближенням до мінімальних значень співвідношення, близьким до 0,1. При цьому вплив тертя, як фактору протікання процесу деформації, посилюватиметься із збільшенням співвідношення ширини впроваджуваного бойка до діаметру заготовки. Чим більше буде збільшуватися це співвідношення - тим більший вплив буде надавати тертя внаслідок збільшення площі контакту бойка і заготовки. Таким чином було прийнято рішення використовувати бойки товщиною 0,1..0,3 $D_{заг}$, для мінімізації впливу фактора тертя в процесі кування.

Під різною формою інструменту і заготовки розуміється не тільки форма (прямокутний бойок і циліндрична заготовка), але також і співвідношення геометричних розмірів бойка і діаметра заготовки. При цьому на кут скосів при вдавлюванні інструменту також вплине і глибина вдавлювання. Однак глибина вдавлювання обмежена геометричними розмірами готового виробу, так як вдавлювати інструмент можна тільки до глибини, яка дорівнює різниці діаметра заготовки і діаметра шатунної шийки ($h_{вн} = D_{заг} - d_{ш}$). Таким чином, на основі аналізу технологічних карт виробництва поковок і креслень готових виробів було прийнято рішення обмежити глибину вдавлювання бойка в заготовку в інтервалі 0,3..0,7 $D_{заг}$.

Далі, були визначені наступні параметри, засновані на огляді наукових робіт, пов'язаних з куванням колінчастих валів, а також, в основному, засновані на розгляді технологічних карт кування колінчастих валів, які застосовуються на підприємствах.

Виходячи з технологічних карт кування, матеріалом для експерименту була обрана конструкційна легована сталь 40ХН2МА. Дана сталь найбільш часто застосовується при виготовленні колінчастих валів, серед великого розмаїття інших сталей, як легованих конструкційних сталей (сталь 40Х, 45Х, 40ХН, 34ХН1М та ін.), так і вуглецевих сталей (серед них найбільш використовуваною є сталь 45). Для сталі 40ХН2МА температурний інтервал кування, згідно з літературними джерелами [33] становить 1200 - 800°С для інтенсивної деформації і нижній температурний інтервал для операцій прогладжування становить 700°С.

Вид реологічної залежності для сталі 40ХН2МА представлений класом реологічно складною сталі з наявністю одного максимуму на кривій зміцнення (рис. 3.1) [58, 59]. Модель розроблена в роботах [58, 59, 62], задовільно описує реологічні криві різного ступеня складності металів третього класу. Свинець, що володіє чудовою властивістю рекристаллізуватися при кімнатній температурі, єдиний метал, який може бути використаний для моделювання процесів гарячої обробки металів тиском.

Для фізичного моделювання сталі 40ХН2МА і даних умов деформації відповідною маркою свинцю є марка С1. В роботі [57] наведено пластометричні криві реологічно складних сплавів-моделей. За вмістом свинцю у марці свинцю С1 (Pb - 99,95%) можна визначити характер реологічної кривої для цієї марки свинцю. Хімічний склад марки С1 представлений наступними елементами: Pb - 99,95%, Ag - 0,0015%, Ci - 0,001%, As - 0,002%, Sb - 0,005%, Sn -0,002%, Zn - 0,002%, Fe - 0,003%, Bi - 0,03%, Mg - 0,005%, Ca+Na - 0,02%. На рисунку 3.2 зображено криві зміцнення для свинцю.

Характер зміни реологічної кривої для сталі 40ХН2МА наведено на рис. 3.1 [77]. Аналіз кривих зміцнення обраної марки свинцю С1 і стали 40ХН2МА показує їх реологічне подібність у розглянутому інтервалі швидкостей і температур деформації металу при осаджуванні.

Розміри заготовки та інструменту взяті в певному масштабі. Цей масштаб був визначений у відповідності об’єму і розмірів заготовки під кування колінчастого валу в реальному технологічному процесі і досліджуваної моделі. В даному випадку

масштаб становить 17,5 для спрощення перерахунку об'єму та розмірів заготовки, а так само параметрів інструменту і процесу кування.

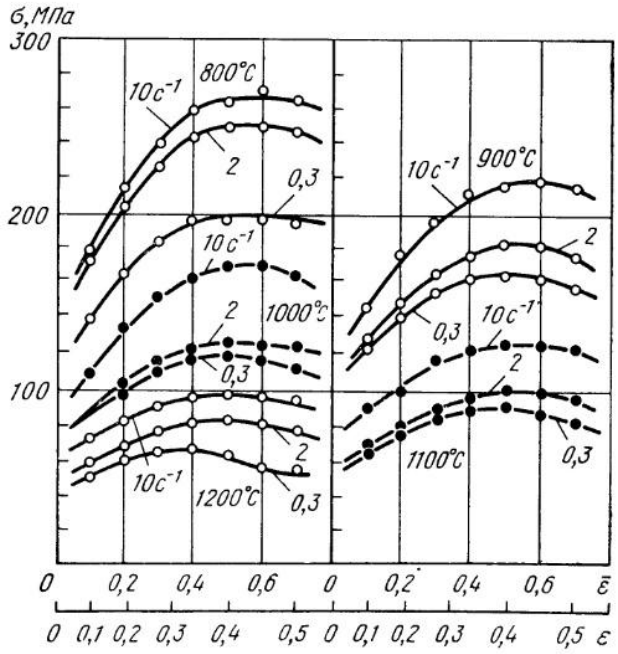


Рисунок 3.1 – Криві зміцнення сталі 40ХН2МА [77].

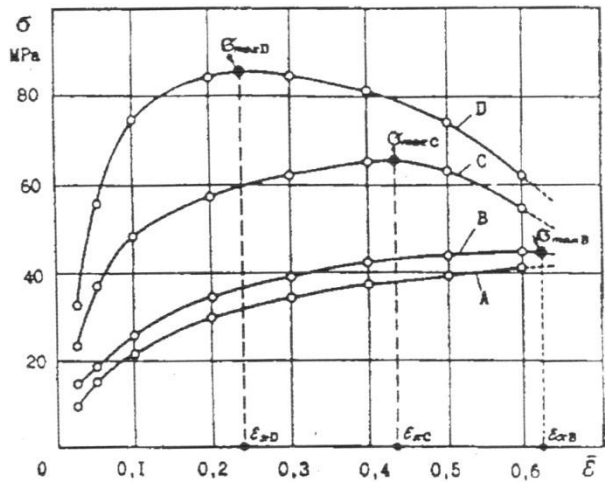


Рисунок 3.2 – Пластометричні криві нових реологічно складних сплавів-моделей: A – чистого свинцю (99,99% Pb); B – сплаву з (99,9% Pb); C – сплаву з (99,4% Pb); D – сплаву з (99,0% Pb) [63].

За вихідну заготовку, в реальному технологічному процесі, узятий гладкий вал з діаметром 710 мм, отриманий куванням зливка масою 6,5 тонн. Така поковка колінчастого вала, геометрично складається з чотирьох

циліндрів різного діаметру і довжини. За основу взято циліндр найбільшого діаметра, а саме 700 мм, а решта циліндрів, ґрунтуючись на їх об'ємі, перераховані на діаметр 700 мм. В результаті розрахунків, довжина такої заготовки становить 1390 мм. Таким чином, розміри заготовки досліджуваної моделі, з урахуванням масштабного коефіцієнта, склали: 80 мм – довжина заготовки; 40 мм – діаметр заготовки. Відповідно товщина інструмента, яка складає 0,1..0,3 $D_{заг}$, дорівнює 4 мм, 8 мм і 12 мм. Глибина вдавлювання бойка в заготовку, яка складає 0,3..0,7 $D_{заг}$, дорівнює 12 мм, 20 мм і 28 мм відповідно.

3.2 Опис проведеного експерименту

Проведення експерименту починається з постановки задачі. Завданням даного експерименту є пошук раціональних параметрів процесу вдавлювання тонкого бойка в поковку колінчатого валу для аналізу формозміни металу при отримання поковок типу колінчастий вал на гідравлічних пресах.

Визначивши завдання для проведення експерименту, необхідно визначити залежні і незалежні параметри. Залежними параметрами, в даній роботі, є кінцеві геометричні параметри експериментального зразка або, так званий, відгук. Незалежними параметрами (чинниками) можуть бути як кількісні, так і якісні параметри. В даній роботі незалежними параметрами виступають: $\Delta D \backslash D_{заг}$ – відношення зміни максимального діаметру до діаметру заготовки; $l_{кв} \backslash D_{заг}$ – відношення довжини контакту заготовки с верхнім інструментом до діаметра заготовки; $l_{кн} \backslash D_{заг}$ – відношення довжини контакту заготовки з нижнім інструментом до діаметра заготовки; h'\h" – відношення висотних показників бочкоподібності поверхні; $H \backslash D_{заг}$ – відношення висоти коліна до діаметра заготовки.

Ці фактори відносяться до параметрів протікання процесу вдавлювання тонкого бойка в поковку колінчастого валу і характеризують співвідношення геометричних параметрів інструменту і заготовки. Також, важливим фактором є товщина деформуючого інструменту, яка характеризує геометричні параметри нового технологічного інструменту. Інші геометричні параметри інструменту не

беруться до уваги, з причини їх не значущості, так як висота тонкого бойка, який вдавлюють в заготовку, прийнята незмінною, а довжина набагато перевершує діаметр поковки, внаслідок виконання умови отримання виїмки.

Проектування цього інструменту, і як наслідок, додавання ще однієї операції кування в технологію отримання поковок колінчастих валів, було обумовлено тим, що в даний час виробництво колінчатих валів ведеться з призначенням напуску металу на простір між щік коліна, який потім видаляється механічною обробкою, що веде до надлишкових витрат металу.

У зв'язку з цим був запропонований новий спосіб виготовлення поковок колінчастих валів з проміжною ковальської операцією вдавлювання тонкого бойка в заготовку. Перед здійсненням операції, передують ще кілька основних ковальських операцій:

1) білетування і осаджування зливка;

2) протягування зливка на необхідний діаметр;

Після цих двох операцій слідує операція вдавлювання тонкого бойка в заготовку. Таким чином, варіюючи фактори процесу і слідуючи складеному плану експерименту, було проведено 12 дослідів. В даному випадку, для параметру глибини вдавлювання бойка, була взята величина, яка дорівнює 0,1 $D_{заг}$, тобто 4 мм, яка слугує для перевірки раціональності вибраного інтервалу 0,3..0,7 $D_{заг}$. Таким чином, до вихідних дев’яти дослідів додається ще три. Обладнання, яке використовувалося для проведення досліду, знаходиться в лабораторії кафедри ОМТ Національної Металургійної Академії України.

Критерії швидкісної подібності підбираються шляхом зменшення швидкості деформування на свинці в порівнянні з деформуванням металу на гідравлічному пресі. Швидкість руху верхньої плити на гідравлічному кувальному пресі становить 100..150 мм/с. Згідно з умовами теорії подібності швидкість деформації на свинці повинна бути менше швидкості деформації на металі на величину, рівну масштабом моделювання. Швидкість руху інструменту в лабораторних умовах на універсальній випробувальній машині становить 100 мм/хв.

Розглянуті схеми вдавлювання бойка в заготовку були реалізовані на універсальній випробувальній машині ГМС-50, яка є контрольно-вимірювальним приладом і призначена для статичних випробувань на розтяг, стиск і вигин. Машина може працювати при короткочасних навантаженнях від 0 до 50 тонн і при тривалих навантаженнях від 0 до 25 тонн. Точність установки характеризується середніми відхиленнями знімаються показань від дійсних навантажень в межах ±1%. Загальний вигляд установки наведено на рис.3.3.

Установка ГМС-50 складається з наступних агрегатів: вузла власне машини - робочої частини; вузла пульта управління, що включає вимірювач сили, насосну установку, що створює робоче зусилля, і систему управління. Власне машина є двоколонної вертикальної машиною з гідравлічним і механічними приводами переміщення рухомої траверси.

Кінематично, машина являє собою дві парні рами, одна з яких нерухома, а інша рухома. Нерухома рама складена з підстави та траверси, з'єднаних двома колонами. У траверсу встановлена гідравлічна пара, що представляє собою робочий циліндр і поршень. На подушку поршня через кульку і конус спирається рухома рама. Рухома рама складена з рухомої траверси і моторної траверси, пов'язаних двома ходовими гвинтами. Робочий хід рухомої траверси здійснюється гідравлічним приводом. Механічні приводи рухомої траверси і нижнього захоплення служать для установки при налаштуванні машини на випробування. Наявність механічних приводів розширює межі можливих випробувань зразків або виробів, що полегшує і прискорює процес їх установки.

Для керування механізмами привода рухомої траверси і нижнього захоплення на хомуті правої колони розташовані кнопкові станції. Верхня частина рухомої траверси служить столом, на якому встановлюється нижня частина пристосувань для випробувань на стиск. Максимальний хід підйому рухомих частин машини становить 265 мм. Про величину підйому рухомих частин, а також про величину деформації при випробуваннях на стиск можна судити по нерухомій лінійці і вказівної шайбі закріпленої на кінці лівого ходового гвинта. При проведенні

випробування на стиск можуть бути випробувані зразки або вироби будь-якої форми, кінці яких вписуються в коло діаметром 100 мм.

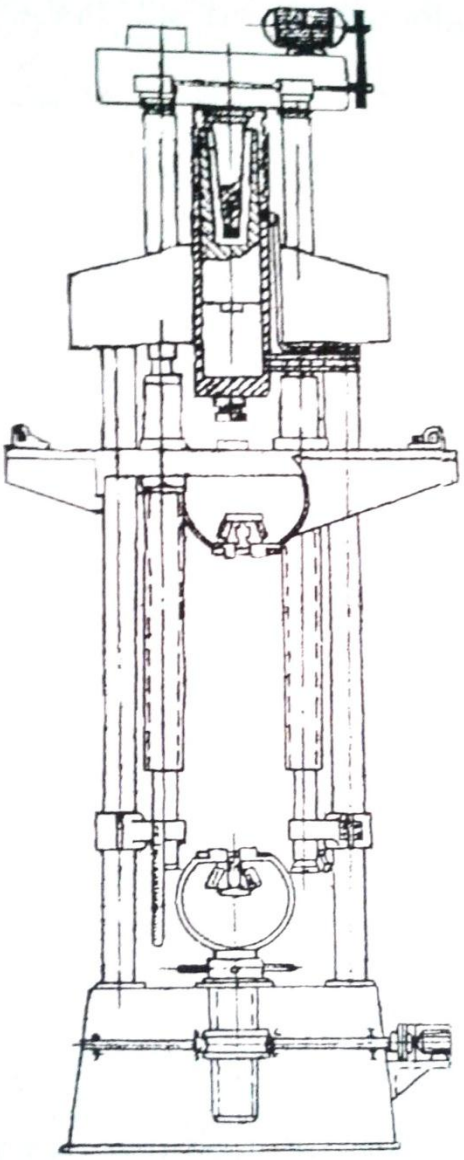


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд універсальної машини ГМС-50

Випробовуваний на стиск зразок або виріб ставиться на нижню подушку (нижню частину пристосування), яка встановлюється в центральну проточку зверху рухомої траверси. У нижній торець робочого циліндра на хвостовику, оберігаючи від випадання спеціальним замком збоку циліндра, підвішена самоустановлювальні сферична опора (верхня частина пристосування). Співвісність зразка і опор повинна бути витримана. Піднімаються рухомі

частини на 20..30 мм, перевіряється і встановлюється робоча стрілка на нуль. Механічним приводом підводиться рухома траверса до упору випробовуваного зразка у верхню опору пристосування. Після цього випробовуваний зразок подається робоча навантаження до певної деформації. Потім проводиться запис результатів випробувань в журнал.

Для проведення експериментального дослідження було виготовлено три бойка з товщиною 4 мм, 8 мм і 12 мм Виготовлений інструмент зображено на рисунках 3.4 та 3.5.

До верхньої частині бойка прикріплений утримувач, який дозволяє розташувати та закріпити деформуючий інструмент у верхній траверсі пресу. Також для бойків з товщиною 4 мм та 8 мм, у верхній частині, яка прилягає до утримувача, прикріплена пластина, яка усуває можливість вигину бойка в процесі деформування та покращує жорсткість усієї конструкції.

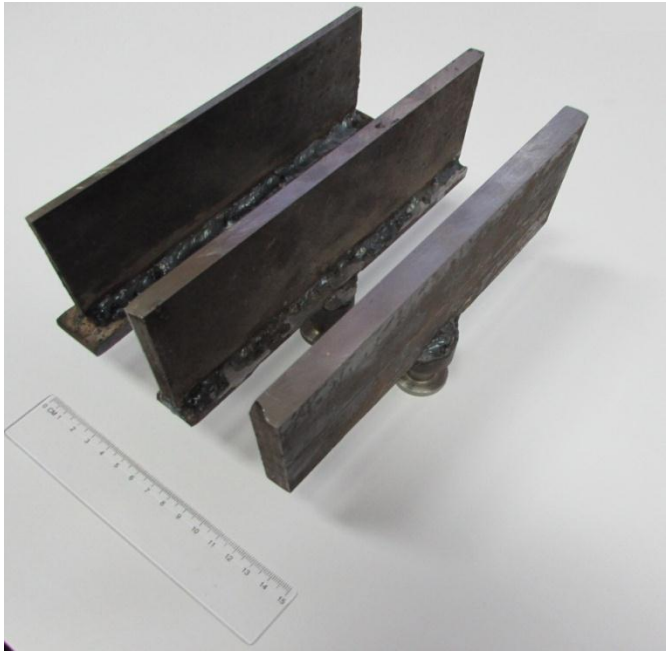


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд деформуючого інструменту. Товщина бойків.

Далі було виготовлено 48 зразків зі свинцю (по три дублі на кожен з дванадцяти дослідів). Діаметр зразків складає 40 мм, а довжина 50 мм. Довжина зразка була вирахувана із об’єму металу під кування коліна валу, з урахуванням масштабу експерименту.

Рисунок 3.5 – Загальний вигляд бойків. Габаритні розміри.

На рисунку 3.6 зображено свинцеві зразки у загальному вигляді.

Рисунок 3.6 – Загальний вигляд зразків зі свинцю.

На рисунку 3.7 зображено приклад розташування бойка та заготовки для експериментального дослідження вдавлювання бойка в заготовку.

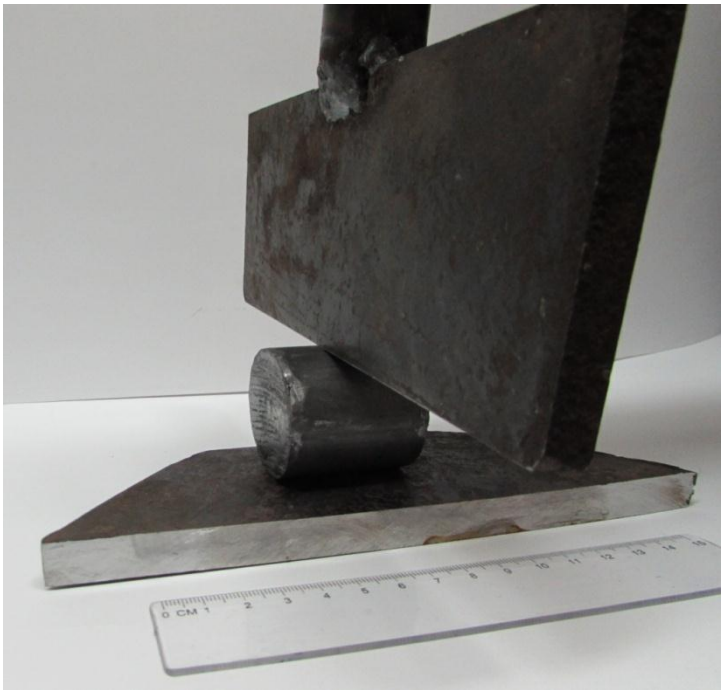


Рисунок 3.7 – Приклад розташування бойка та заготовки

Для обмеження руху інструменту та фіксування глибини вдавлювання бойка в заготовку, було застосовано підкладні пластини з обох боків від заготовки (рис. 3.8). Підкладні пластини мають товщину 12 мм (нижні), та по 8 мм кожні наступні, для того щоб забезпечити глибину вдавлювання на рівні 4 мм, 12 мм, 20 мм та 28 мм. Глибина вдавлювання 4 мм була вибрана лише для перевірки можливих раціональних глибин вдавлювання бойка, та не входить до плану експерименту, хоча експериментальні дані все одно були взяті для порівняння з іншими результатами.

На рисунку 3.8 зображено розташування інструменту та заготовки в робочому просторі пресу.

Таким чином, в результаті експериментального дослідження було отримано 12 зразків для кожного дубля. На рисунку 3.9 зображено зразки після деформування.

На рисунку 3.9 зразки розташовані в такому порядку: зверху вниз – збільшення глибини вдавлювання від 4 мм до 28 мм з шагом у 8 мм; з права на – збільшення товщини інструменту з 4 мм до 12 мм.

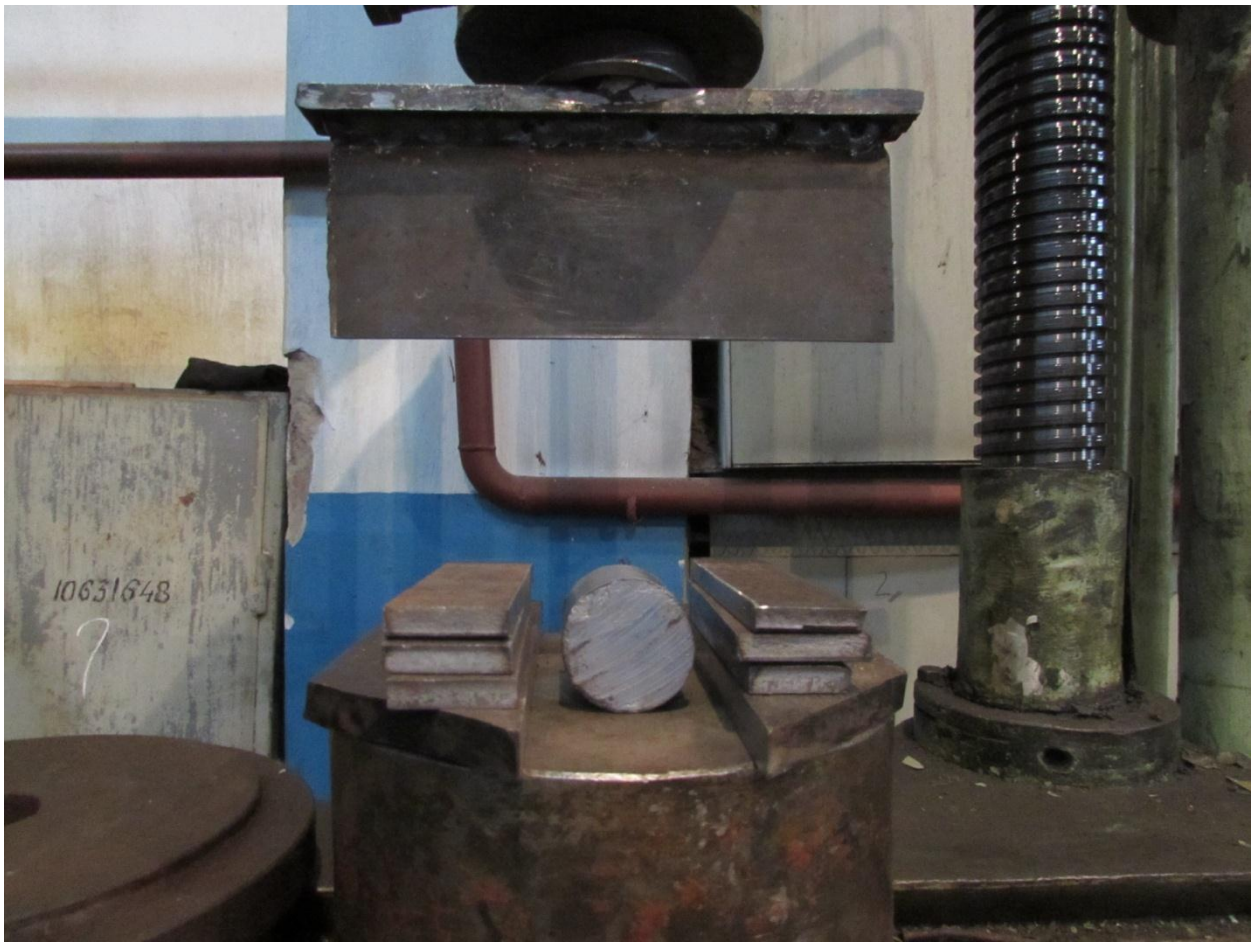


Рисунок 3.8 – Розташування інструменту та заготовки в робочому просторі пресу

На рисунку 3.10 зображено експериментальні зразки у вигляді збоку. На рисунку 3.10 заготовки розташовані у такому порядку: зверху вниз – збільшення товщини бойка від 4 мм до 12 мм, та з права на ліво – збільшення глибини вдавлювання бойка від 4 мм до 28 мм. Як бачимо, при збільшенні товщини інструменту та глибини вдавлювання бойка (рис. 3.8 та 3.9), помітно зростає утяжина металу у зоні контакту заготовки з інструментом.

Також помітно зростає викривлення заготовки (у повздовжньому напрямку, рис. 3.10) та утворення бочкоподібної поверхні у зоні деформації,

тобто в об’ємі металу під кування шатунної шийки, у подібності до процесу осаджування заготовок з великими ступенями деформації (рис. 3.9).

Рисунок 3.9 – Зразки після деформування (вид зверху)

Рисунок 3.10 – Експериментальні зразки у вигляді збоку

Після проведення експерименту, заготовки було обміряно та дані занесені у таблиці. Аналіз формозміни металу розглянуто у наступному пункті даного розділу дисертаційної роботи.

3.3 Аналіз результатів проведеного експерименту

Для аналізу даних необхідно спочатку якісно оцінити формозміну металу після проведеного експерименту, а також порівняти отримані дані з вже отриманими даними при комп’ютерному моделюванні процесу. Аналіз даних проведеного натурного експерименту слід провести по тій самій схемі, як і для комп’ютерного моделювання. Для цього необхідно розглянути геометричні параметри зразків, зображені на рисунку 3.11.

Як бачимо, як при натурному експериментальному дослідженні, так і при комп’ютерному моделюванні зразки отримано майже ідентичні. Однак для якихось висновків про подібність комп’ютерної моделі та натури цього

замало. Для цього необхідно розглянути процес формозміни в абсолютних або відносних величинах. Такий аналіз вже було проведено для комп'ютерної моделі та описано у розділі 2 даної дисертаційної роботи.

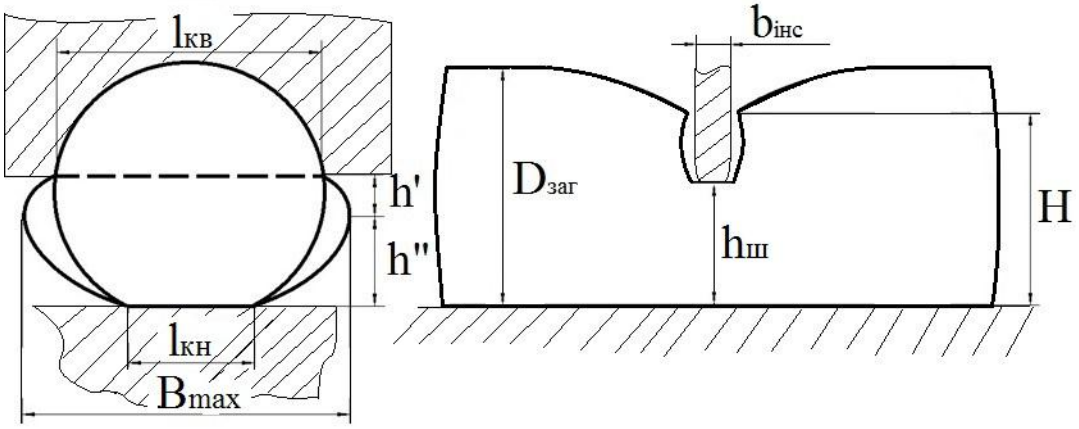


Рисунок 3.11 – Основні геометричні параметри зразків після деформування

На рисунку 3.12 зображено порівняння зовнішнього виду отриманих зразків при натурному експерименті та при комп'ютерному моделюванні, при застосуванні бойка з товщиною 4 мм (а), товщиною 8 мм (б) та товщиною 12 мм (в) для різних глибин вдавлювання.

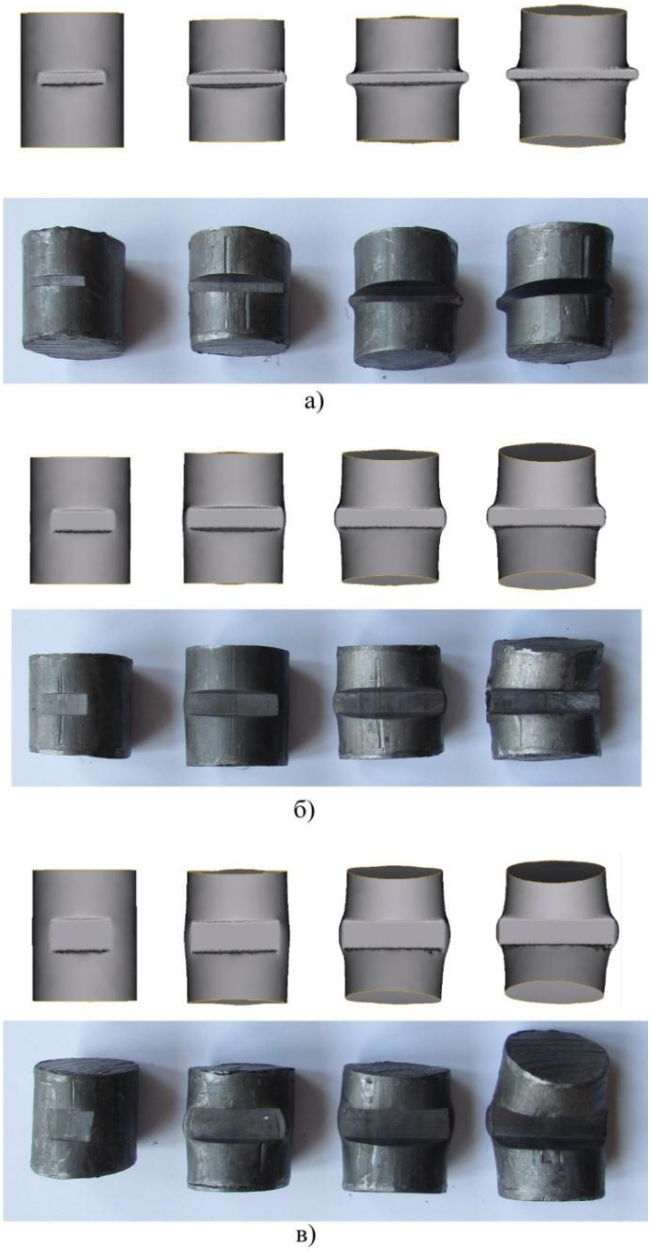


Рисунок 3.11 – Порівняння зовнішнього виду зразків після натурного експерименту та після комп’ютерного моделювання. Вид зверху

Отримані дані було проаналізовано та побудовано графіки залежності зміни визначених геометричних параметрів заготовки від товщини використаного інструменту та глибини вдавлювання. Ці графіки було співставлено із графіками залежності для комп’ютерного моделювання. На рисунках 3.13 – 3.17 зображено графіки залежностей зміни геометричних параметрів зразків при натурному експерименті та при комп’ютерному моделюванні. На графіках суцільною лінією зображено аналіз даних після

комп'ютерного моделювання, а штриховою лінією – аналіз даних після натурного експерименту.

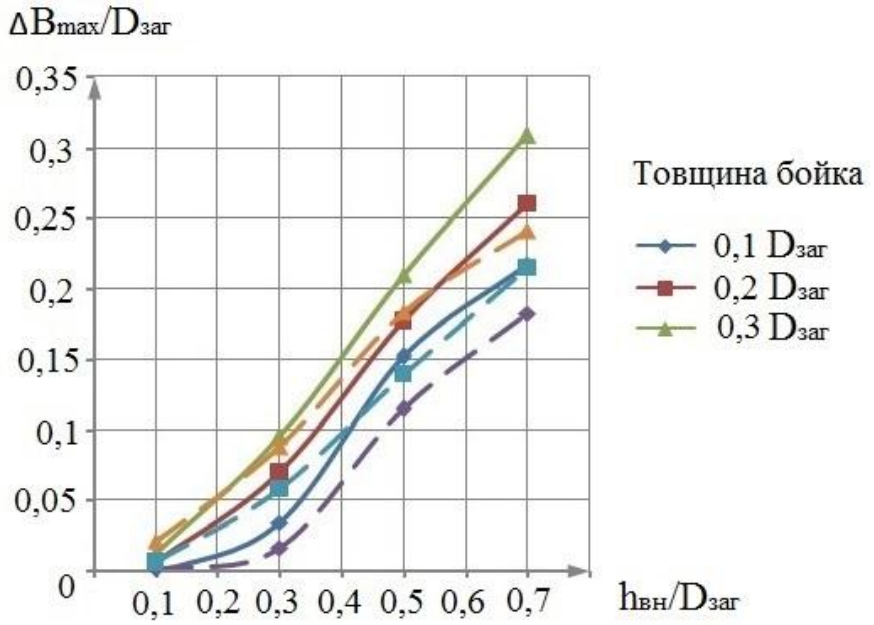


Рисунок 3.13 – Залежність зміни поширення металу в зоні деформації від глибини вдавлювання інструменту

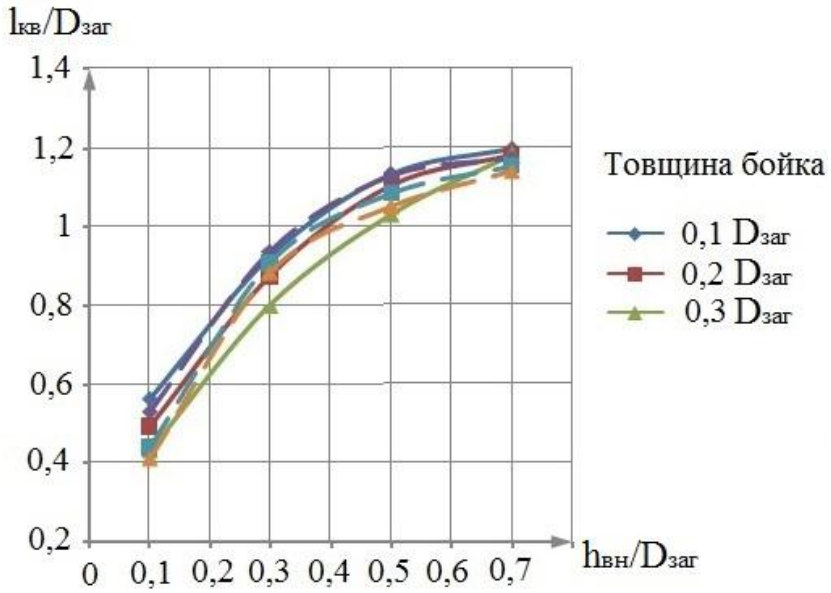


Рисунок 3.14 – Залежність зміни довжини контакту верхнього деформуючого інструменту з заготовкою від глибини вдавлювання бойка

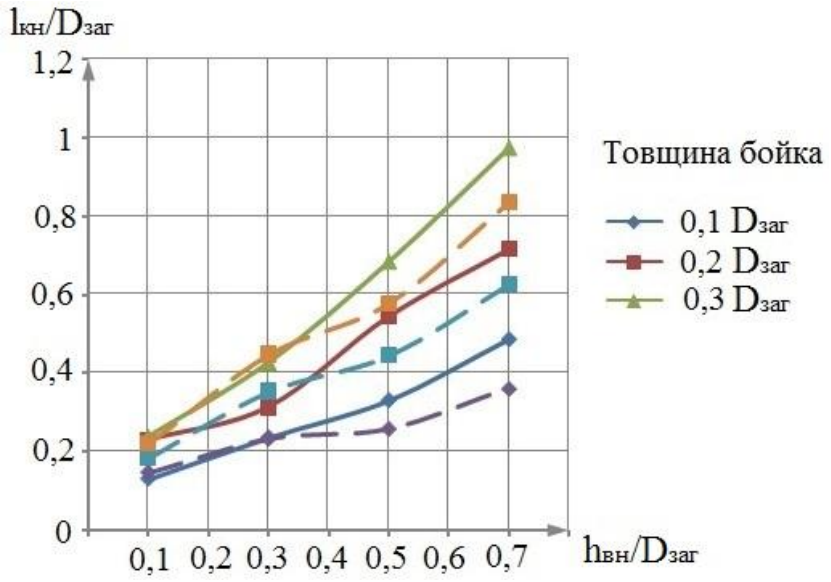


Рисунок 3.15 - Залежність зміни довжини контакту нижнього деформуючого інструменту з заготовкою від глибини вдавлювання бойка

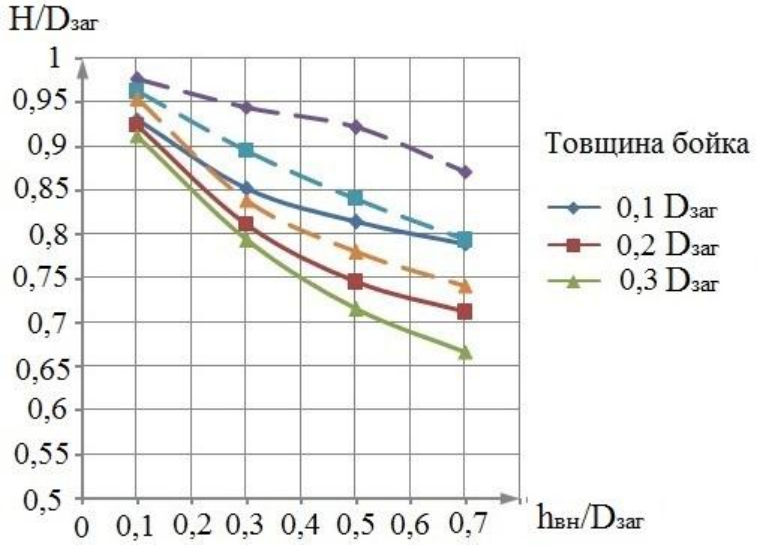


Рисунок 3.16 – Залежність зміни висоти коліна від глибини вдавлювання бойка

Зображені на рисунках 3.13 – 3.17 залежності мають схожий характер, однак не повність повторюються при натурному експерименті та комп’ютерному моделюванні. Це є наслідком не достатньо точного вимірювання геометричних параметрів зразків у натурі, на відміну від комп’ютерної моделі, де можливо побачити розміри зразків з дуже великою точністю. Також даний розбіг значень можливий із за деякої невеликої

похибки при проведенні натурного експерименту, так як швидкість руху інструменту приймається рівною 15 мм\с у середньому, однак може варіюватися у деякому невеликому інтервалі. Із за цього можлива невелика розбіжність у швидкості деформування, що має вплив на формозміну металу.

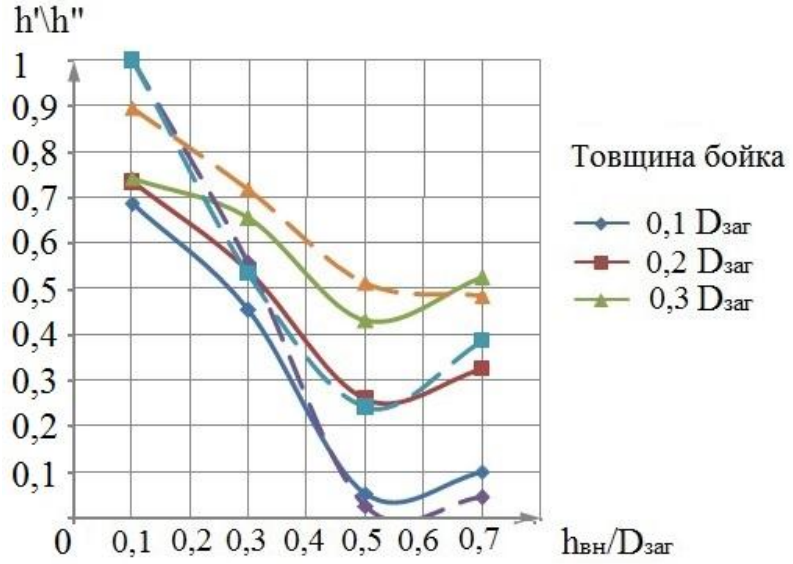


Рисунок 3.17 – Залежність зміни фактору форми бічної поверхні зразка у зоні деформації від глибини вдавлювання інструменту

Також слід зазначити деяку розбіжність даних при комп’ютерному моделюванні та натурному експерименті, саме в тих дослідах, в яких було використано бойки різної товщини, але при глибині вдавлювання 0,1 $D_{заг}$. Це викликано тим, що при комп’ютерному моделюванні існує велика похибка при дослідженні процесів з дуже малими ступенями деформації (наприклад рис. 3.17). Про це було сказано в розділі 2 даної дисертаційної роботи, а саме про те, що при малих глибинах вдавлювання бойка (від 0,1 до 0,3 $D_{заг}$) розроблена схема є не ефективною. Далі, для більш точного аналізу похибки між натурним експериментом та комп’ютерною моделлю, було вирішено порівняти основні геометричні параметри зразків після деформування у абсолютних величинах. Отримані дані були занесені в таблиці для порівняння, а також вирахувано похибку експериментальних даних. Ці дані приведені в таблицях 3.1 – 3.4.

Таким чином, як бачимо, відносна похибка отриманих при комп'ютерному моделюванні та натурному експерименті даних, у середньому, знаходиться в межах 10%, а в більшості не перевищує 5%. Однак в деяких випадках спостерігається дуже велика похибка (приблизно25-35%), як це видно в таблиці 3.2, де порівняно дані по довжині контакту верхнього інструменту з заготовкою. Це пов'язано з тим, як вже було сказано, із дуже низькою точністю розрахунків при комп'ютерному моделюванні при малих ступенях деформації (глибині вдавлювання 0,1 $D_{заг}$).

Таблиця 3.1 – Похибка величини поширення металу в зоні деформації при комп'ютерному моделюванні та при натурному експерименті

Товщина бойка	Глибина вдавлювання	D_1, Моделювання	D_1, Експеримент	ΔD_1	%
4mm	4mm	39,796	40,04	0,244	0,61
	12mm	40,784	40,63	-0,154	-0,38
	20mm	46,607	44,58	-2,027	-4,55
	28mm	49,01	47,29	-1,72	-3,64
8mm	4mm	39,821	40,23	0,409	1,02
	12mm	41,881	42,3	0,419	0,99
	20mm	46,865	45,57	-1,295	-2,84
	28mm	49,923	48,56	-1,363	-2,81
12mm	4mm	40,056	40,82	0,764	1,87
	12mm	42,85	43,52	0,67	1,54
	20mm	47,324	47,34	0,016	0,03
	28mm	50,545	49,64	-0,905	-1,82

Таблиця 3.2 - Похибка довжини зони контакту верхнього інструменту із заготовкою при комп'ютерному моделюванні та при натурному експерименті

Товщина бойка	Глибина вдавлювання	D', Моделювання	D', Експеримент	ΔD'	%
4mm	4mm	26,315	21,16	5,155	24,36
	12mm	41,233	37,43	3,803	10,16
	20mm	47,298	45,01	2,288	5,08
	28mm	48,032	46,86	1,172	2,5
8mm	4mm	24,29	17,49	6,8	38,88
	12mm	38,36	36,16	2,2	6,08
	20mm	44,908	43,27	1,638	3,78
	28mm	47,856	46,13	1,726	3,74
12mm	4mm	21,647	16,46	5,187	31,51

	12mm	35,43	35,3	0,13	0,37
	20mm	42,475	42,03	0,445	1,06
	28mm	46,524	45,61	0,914	2

Таблиця 3.3 - Похибка довжини зони контакту нижнього інструменту із заготовкою при комп’ютерному моделюванні та при натурному експерименті

Товщина бойка	Глибина вдавлювання	D”, Моделювання	D”, Експеримент	ΔD"	%
4mm	4mm	5,12	5,83	0,71	12,18
	12mm	7,74	9,28	1,54	16,59
	20mm	8,544	10,28	1,736	16,89
	28mm	14,336	14,39	0,054	0,37
8mm	4mm	7,48	7,31	-0,17	-2,32
	12mm	12,862	14,06	1,198	8,52
	20mm	18,508	17,74	-0,768	-4,33
	28mm	24,357	24,96	0,603	2,42
12mm	4mm	8,17	8,76	0,59	6,73
	12mm	16,248	17,86	1,612	9,02
	20mm	22,831	23,07	0,239	1,04
	28mm	34,27	33,34	-0,93	-2,79

Таблиця 3.4 - Похибка висоти коліна валу при комп’ютерному моделюванні та при натурному експерименті

Товщина бойка	Глибина вдавлювання	H, Моделювання	H, Експеримент	ΔH	%
4mm	4mm	37,247	36,46	0,787	2,16
	12mm	34,067	34,816	-0,749	-2,15
	20mm	32,546	31,962	0,584	1,83
	28mm	31,555	30,69	0,865	2,82
8mm	4mm	36,982	36,355	0,627	1,72
	12mm	32,457	32,286	0,171	0,53
	20mm	29,818	28,742	1,076	3,74
	28mm	28,462	27,11	1,352	4,99
12mm	4mm	36,468	36,247	0,221	0,61
	12mm	31,741	30,222	1,519	5,03
	20mm	28,601	27,784	0,817	2,94
	28mm	26,656	25,823	0,833	3,22

Ці дані дають змогу зробити висновок про адекватність комп’ютерної моделі, тобто про правильність заданих параметрів та процесу розрахунку в цілому, яка

підтверджена експериментальними даними. Розрахована похибка величин не перевищує 10%, що є задовільним для моделювання технічної задачі.

3.4 Висновки до розділу 3

В даному розділі розглянуто експериментальне вивчення процесу формозміни металу при виготовленні поковки колінчастого валу з отриманням шатунної шийки вільним куванням, а саме, процес вдавлювання бойка в заготовку. Проведено фізичне моделювання та отримано дані по формозміні металу, які в свою чергу проаналізовано та побудовано графічні залежності, які відображають зміну контрольних геометричних параметрів заготовки після деформування від вхідних параметрів процесу. Розглянуто можливість використання свинцю для фізичного моделювання формозміни сталі 40ХН2МА при її гарячому деформуванні.

До вхідних параметрів відносяться глибина вдавлювання бойка ($h_{вн}$), яка складає 0,3..0,7 від діаметру заготовки, та товщина деформуючого інструменту ($b_{інст}$), яка складає 0,1..0,3 від діаметру заготовки. Складено план експерименту, який налічує 12 дослідів. Проведено фізичне моделювання процесу із застосуванням свинцевих зразків. На основі аналізу отриманих даних по формозміні заготовки, визначено раціональні інтервали досліджуваних параметрів кування ($h_{вд}$, $b_{інст}$). Таким чином, товщина бойка обмежена по верхньому інтервалу сильним викривленням заготовки, та можливістю захоплення бойка металом, а по нижньому – можливістю вигину бойка або його руйнуванню. Ступінь деформації, який відповідає глибині вдавлювання бойка, також обмежено по верхній границі інтервалу сильним викривленням заготовки, а по нижньому – ефективністю розробленої схеми в цілях метало заощадження.

Для перевірки адекватності комп’ютерної моделі, порівняно дані комп’ютерного моделювання із даними, отриманими при фізичному моделюванні процесу. Співставлено графіки залежностей зміни

досліджуваних геометричних параметрів. Проаналізовано розбіжність даних, отриманих при комп’ютерному та фізичному моделюванні. Даний аналіз показав, що зміна параметрів геометрії заготовки майже ідентична в обох випадках, та має максимальну розбіжність величин в інтервалі ±10%, що є достатнім для вирішення технічної задачі, та свідчить про правильність побудованої комп’ютерної моделі.

4. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОКОВОК КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ З ОТРИМАННЯМ ШАТУННОЇ ШИЙКИ ВІЛЬНИМ КУВАННЯМ

4.1 Розробка технологічного процесу виготовлення поковок колінчастих валів

На основі аналізу існуючих джерел були розглянуті технології виготовлення поковок колінчастих валів, а також виявлено їх недоліки та на основі недоліків існуючих технологічних схем розроблена вдосконалена технологія. Розглянемо спочатку типові існуючі технології.

Відомий спосіб кування крупних колінчастих валів, при якому шляхом формування гнуттям та висаджуванням шийки та щік коліна при одночасному прикладанні до заготовки сили деформування в напрямку, перпендикулярному її осі та сили деформування вздовж її осі при вільній течії металу по периметру щік, отримують поковку колінчастого валу. При цьому, ділянки під щоки обирають об’ємом з урахуванням об’єму утяжини. Щоки формують висотою, яка перебільшує номінальну їх висоту на величину об’єму утяжини, а по закінченні гнуття та висаджування проводять осаджування щік по висоті до номінальних розмірів. Таким чином формується коліно вала, яке потребує лише невелику механічну обробку, що є перевагою з точки зору економії металу [78].

Недоліком даного способу є те, що для здійснення деформації необхідна попередньо спрофільована механічною обробкою заготовка, що виключає можливість отримання поковки з меншим або більшим розміром коліна з однієї заготовки. Також недоліком є те, що для здійснення деформації потрібен інструмент зі спеціальною конструкцією, який є невигідним з економічної точки зору, для виготовлення одиничних виробів, а також потребує спеціальний парк інструменту для виготовлення поковок різного розміру. Також недоліком є неможливість виконання форми коліна різної конфігурації.

Найбільш близьким аналогом є спосіб кування колінчастих валів, який включає осаджування та протягування зливку, після чого протягування заготовки в

бойках із нанесенням насічок перед формуванням корінної частини валу. Заготовку протягують в плоских бойках до восьмигранної форми перерізу, а насічки виконують по схемі: одна горизонтальна та дві вертикальні по відношенню до поперечного перерізу заготовки [79].

За даним способом не можна повною мірою вирішити поставлене завдання по підвищенню якості поковки, тому що корінна частина валу (корінна шийка валу) все одно залишається закритою напуском для подальшої механічної обробки.

В одному з літературних джерел [80] розглянуті схеми кування колінчатих валів, які використовуються на виробництві по сьогоднішній день. За даним джерелом, сам процес кування колінчастого вала може відрізнятися в залежності від конструктивних особливостей вала. Ці відмінності стають помітні при куванні багатоколінчастих валів, проте кування одноколінчастого валу має тільки один варіант виконання. Схема кування одноколінчастого валу приведена на рисунку 4.1.

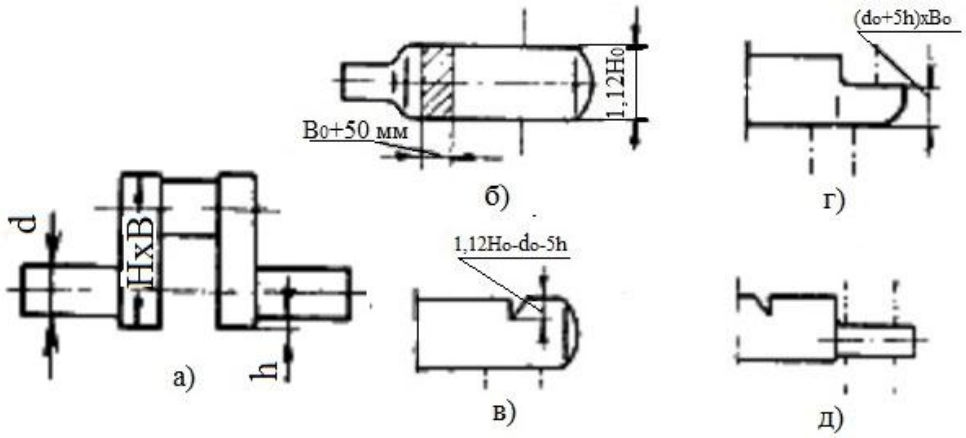


Рис. 4.1 - Схема кування одноколінчастого валу

При цьому схему кування одноколінчастого валу можна розбити по пунктах: 1) кування заготовки на пластину, з розмірами зазначеними в схемі (рис. 4.1, б); 2) перетискання на глибину, яка розраховується за формулою на схемі (рис. 4.1, в); 3) кування кінця валу на перетин, вказаний на схемі (рис. 4.1, г); 4) кування опорної шийки на круглий перетин (рис. 4.1д); 5) кування іншої опорної шийки; 6) кування коліна і правка.

Також, в разі, якщо відстань h ≥ 50 мм (рис. 4.1, а), то шийки відковують з перетисканням з двох сторін [81].

На рисунку 1.13 (розділ 1) зображена узагальнена існуюча технологія виготовлення поковок колінчастих валів із зливків, яка застосовується на підприємствах на цей час. Однак, як бачимо, корінна частина валу (шатунна шийка та щоки) закривається напуском для полегшення технологічного процесу, а також із-за неможливості відкувати шатунну шийку на звичайних кувальних бойках. Це призводить до додаткових витрат металу на етапі механічної обробки поковки.

Так як розглядається весь технологічний процес виготовлення поковки колінчастого валу, від самого початку, тобто білетування та кування зливку, і до самого кінця, тобто відковування опорних шийок, то необхідно спочатку розглянути також етап кування зливку до розмірів заготовки та етап кування опорних шийок.

Кування поковок зі зливків характеризується великими витратами металу, так як донна та прибуткова частина зливку є не придатними для виробів, а це становить 20-30% від маси зливка. При проектуванні технологічного процесу кування, також прагнуть підвищити коефіцієнт використання металу. Одна з таких розробок приведена в [82]. Метою цієї розробки було підвищення коефіцієнта використання металу за рахунок виключення можливості поширення поздовжніх тріщин з прибутковою частини в тіло зливка. Подібним же шляхом йдуть при вдосконаленні форми вихідного зливка за рахунок спеціальної технології відливання зливків зі зменшеною прибутковою частиною, що дозволяє підвищити коефіцієнт використання металу та забезпечити, таким чином, зменшення витрат металу вже на цьому етапі. Сам зливок має форму усіченої піраміди з квадратною поперечним перерізом. Довжина зливка становить 2325 мм, з яких 400 мм - це прибуткова частина. Нижня частина має розміри 575х575 мм, а верхня частина зливка має розміри 725х725 мм. При цьому всі основні грані зливка мають закруглення, і, таким чином, у донної частини зливка кути заокруглені на R = 120 мм, а бічні грані зливка на R = 65 мм. Глибина усадкової раковини дорівнює в середньому 200-400 мм. За результатами моделювання було визначено обсяг металу усадкової раковини, який буде видалений відрізанням. Довжина усадкової раковини, при діаметрі поковки

360 мм, склала 630 мм. При даних розмірах маса обрізу становить приблизно 450 - 550 кг, що відповідає 7-10% від маси вихідного злитка, що в декілька разів менше, в порівнянні з куванням зливків звичайної форми [83].

Ці два етапи поєднані тим, що при куванні застосовуються звичайні бойки, а цей процес відповідає звичайному куванню гладкого валу, і таким чином необхідно визначити найбільш раціональну схему кування для отримання ліпших показників якості та прямолінійності поковки. Для цього звернемо увагу на схеми кування, які застосовуються на виробництві. В цьому напрямку проведене теоретичне дослідження впливу схем кування на нерівномірність розподілення деформацій та прямолінійність отриманих поковок. За основу дослідження взято дві схеми кування, при яких отримується гладкий вал зі зливку. Для моделювання процесу було задано дві схеми кантовок: 1) реальна схема кантовок використовувана на підприємстві (схема 1) 2) схема кантовок розроблена авторами даної роботи (схема 2). Схема кантувань, яка використовується на підприємстві, не має певної послідовності кутів кантувань. Кути кантувань також відрізняються один від одного при кожному обтисненні. Величина кута при кожному обтисненні варіюється в межах від 25° до 50°. При цьому схема кантувань складається з шести обтиснень, після чого проводиться три обтиснення з подачею заготовки і кантуванням її на кут з вищеописаного інтервалу. Величина відносної подачі при цьому становить 0,3 від ширини бойка. Схема кантувань, яка розроблена у співавторстві, є схемою кування «по кільцю» і складається з 15 обтиснень. В даній схемі після першого обтискання слідує кантування на 120°, після цього заготовка знову обтискається та кантується на 120°, потім слідують три обтиснення і кантування на 60° і після цього йдуть 10 обтиснень і кантувань на 15°. Відносна подача при цьому становить 0,5 від ширини бойка. Ступінь деформації при обтисканні, при використанні обох схем кантувань, становить 10%. При куванні за схемою, розробленою у співавторстві, помітна більша рівномірність розподілення деформацій, що видно з меншої різниці величин в перерізі (кривизни ліній на графічних залежностях), а також по мінімальній величині коефіцієнта нерівномірності розподілення деформацій. Виходячи з аналізу результатів моделювання, можна помітити, що нерівномірність розподілу

деформацій в поздовжньому перетині поковки, незважаючи на відмінності параметрів схем кантувань, практично не відрізняються, що свідчить про ефективність розробленої схеми кантувань. Запропонована схема кантувань забезпечує меншу нерівномірність розподілення деформацій, що пов'язано з раціональністю запропонованої схеми і також із суворим дотриманням черговості обтиснень, величин кута кантування і подачі [84].

Таким чином, розробка технологічного процесу виготовлення поковок колінчастих валів з використанням універсального тонкого деформуючого інструменту для отримання поковки колінчастого валу з шатунною шийкою, отриманою куванням, є раціональною. Розроблена технологічна схема виготовлення поковок колінчастих валів відрізняється від існуючої тим, що після отримання заготовки з необхідним діаметром, додається декілька операцій з використанням тонкого деформуючого інструменту, а саме вдавлювання бойка в заготовку та подальше кування шатунної шийки двома тонкими бойками, після чого схема повторює вже існуючу і проводиться правлення, термічна та механічна обробка.

На рисунку 4.2 схематично зображена розроблена технологія виготовлення поковок колінчастих валів з отриманням шатунної шийки вільним куванням при використанні тонкого деформуючого інструменту.

При застосуванні даної схеми кування при першому вдавлюванні бойка забезпечується необхідний діаметр корінної шийки, а при подальшому куванні – її довжина. При збільшенні товщини бойка більше 53% від довжини корінної шийки збільшується викривлення поковки, а при збільшенні глибини першого вдавлювання більше 50% виникає можливість затискання верхнього бойка металом поковки. Зменшення товщини бойків менше 47% від довжини корінної шийки призводить до збільшення витрат металу при механічній обробці, а зменшення глибини первинного вдавлювання менше 20% робить цю схему не корисною.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі кування колінчастих валів, який включає осаджування та протягування заготовки із подальшим формуванням корінної частини валу, і згідно з винаходом, спочатку здійснюють вдавлювання бойка на глибину 20-50% від діаметру заготовки, після чого корінну шийку валу

відковують «тонкими» бойками, товщина яких дорівнює 47-53% від довжини корінної шийки, на восьмикутник, а потім доводять до форми кола [85].

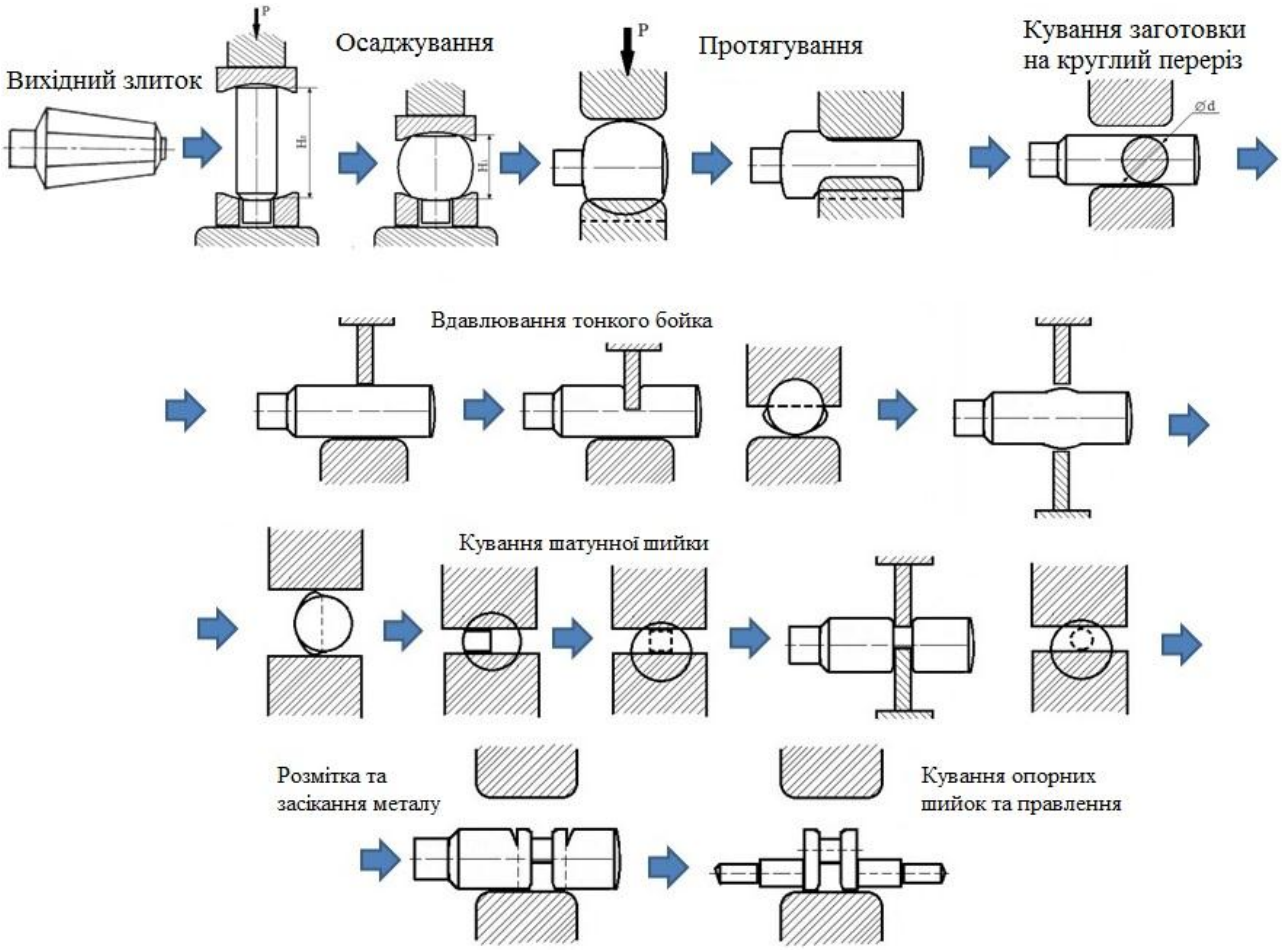


Рисунок 4.2 – Схематичне зображення розробленої технологічної схеми виготовлення поковок колінчастих валів з отриманням шатунної шийки вільним куванням

Після кування шатунної шийки двома «тонкими» бойками, розроблена схема повторює операції із існуючої схеми, тобто спочатку заготовку розмічають та засікають частину металу під кування опорних шийок колінчастого валу, а потім відковують опорні шийки за звичайною схемою при використанні наявного деформуючого інструменту (комбінованих бойків) та вкінці правлять поковку.

При запропонованій схемі кування корінна частина валу набуває форму, наближену до форми готової деталі, що сприяє економії металу, а вибір раціональної схеми кування, за даними, отриманими в цій роботі, з урахуванням

нерівномірності деформації, яка оцінюється за вдосконаленим в роботі методом, поліпшує загальну якість поковок.

4.2 Технологічна застосовуваність досліджених схем кування поковок колінчастих валів

Технологічна схема виготовлення поковки колінчастого валу складається з білетування зливка, осаджування та протягування, після чого слідує протягування опорних шийок. Таким чином основними операціями при виготовленні поковок колінчастих валів на даний час є осаджування та протягування. Взагалі не існує стандарту, або хоча б пункту в якомусь стандарті, де оговорювалися би можливості виготовлення колінчастих валів вільним куванням. Зазвичай на підприємствах використовується або нормативно-технічна документація, розроблена безпосередньо на підприємстві, або ГОСТ, в яких обговорюється виготовлення поковок на гідравлічних пресах. Одним із таких стандартів є ГОСТ 7062-90, в якому обговорюється виготовлення різноманітних поковок вільним куванням на гідравлічних пресах. Саме в цьому стандарті описано правила призначення припусків, допусків та напусків на вироби.

За стандартною технологією, для виготовлення поковок колінчастих валів, застосовують методику призначення припусків та напусків на виготовлення гладких валів за стандартом ГОСТ 7062-90. На рисунку 4.3 зображено ескіз поковки колінчастого валу за стандартною технологією. На рисунку штриховими лініями зображено контур готової деталі, яку закрито припуском та напуском (суцільна лінія).

Такий підхід не є раціональним з точки зору економії металу, так як при масі поковки 4 тони, маса металу, що буде видалена механічною обробкою може складати до 500 кг, що складає 12,5% від маси поковки.

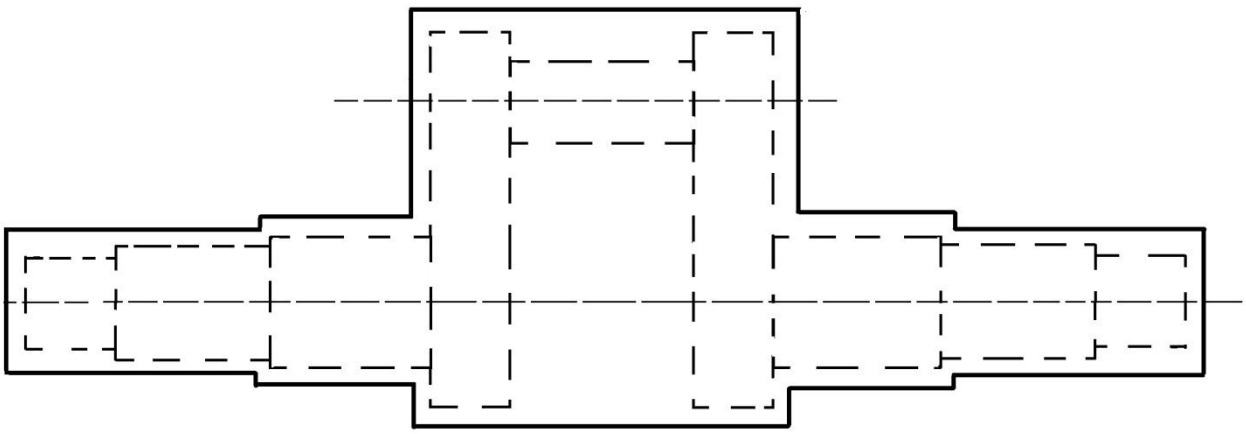


Рисунок 4.3 – Ескіз поковки колінчастого валу за існуючою технологією

Удосконалення такої технології представляється через додання до стандартної послідовності операцій ще однієї, яка може забезпечити отримання шатунної шийки вільним куванням. Ця операція може бути виконана після операції протягування зливка на необхідний діаметр. Сутність цієї операції полягає у вдавлюванні тонкого деформуючого інструменту (бойка) в заготовку, для зміщення частини металу відносно осі поковки та отримання, таким чином, ексцентриситету, а також кування шатунної шийки колінчастого валу до круглого перерізу парою тонких бойків. Таким чином, при застосуванні даної операції, можливе скорочення витрат металу на одну поковку колінчастого валу, а також поліпшення експлуатаційних характеристик за рахунок направлення волокон металу по формі коліна, що знижує ризик утворення тріщин у важко навантажених частинах колінчатого валу при експлуатації.

Згідно проведених в даній дисертаційній роботі досліджень формозміни заготовки, було встановлено, що при деяких співвідношеннях товщини деформуючого інструменту та глибини вдавлювання бойка в заготовку можливе отримання форми поковки, яка буде наближена за формою до готового виробу. Далі розглянемо технологічну застосовуваність розробок при різних співвідношеннях параметрів процесу кування поковки колінчастого валу.

4.3 Застосування тонкого деформуючого інструменту при $b_{інст}\backslash D_{заг}$ = 0,1..0,3 та $h_{вн}\backslash D_{заг}$ = 0,3..0,7.

Технологічна придатність даної схеми кування обумовлена тим, що при застосуванні тонкого деформуючого інструменту корінна частина валу набуває форму, наближену до форми готової деталі, що сприяє економії металу, а також завдяки схемі деформації, зерна металу витягуються по формі коліна, що сприяє подовженню часу служби готової деталі. На рисунку 4.4 показано форму заготовки після отримання шатунної шийки.

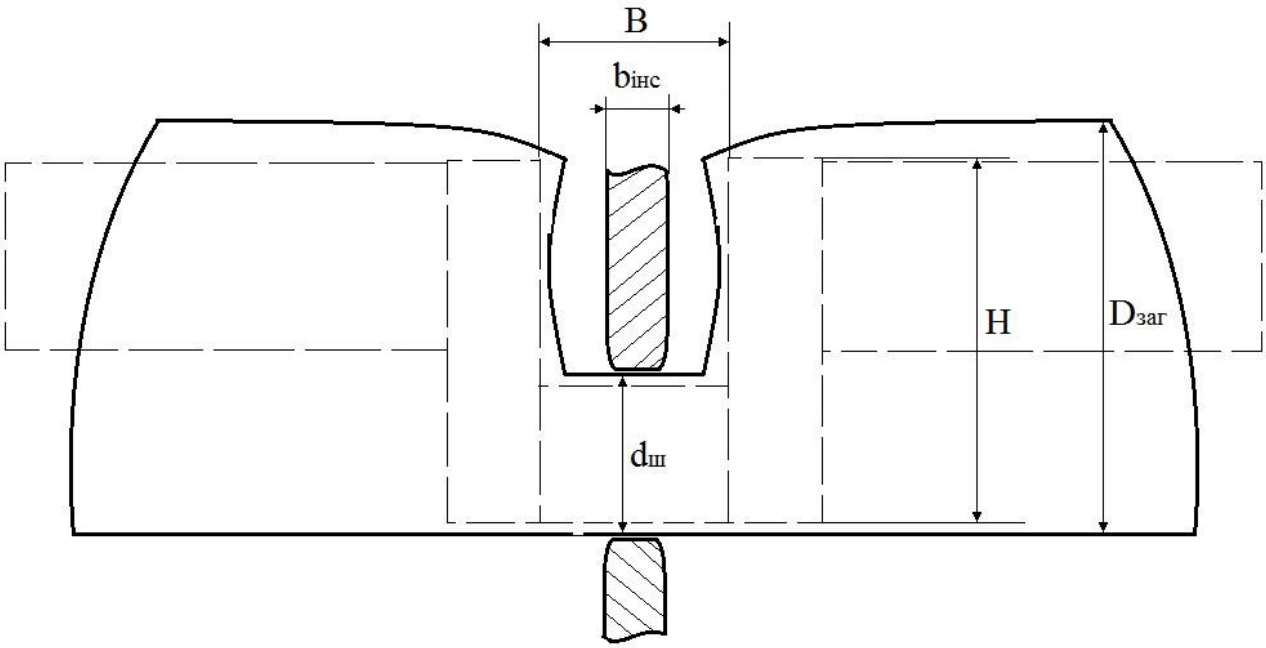


Рисунок 4.4 – Форма заготовки після деформації

Таким чином, знаючи основні геометричні параметри готової деталі, тобто діаметр шатунної шийки ($d_ш$) та ефективний діаметр коліна (H), можливо визначити зміну форми поковки (основних розмірів коліна валу) та вирахувати необхідні кінцеві розміри а також параметри процесу. Застосовуючи товщину інструменту ($b_{інст}$) та глибину вдавлювання бойка ($h_{вн}$) в інтервалах 0,1..0,3 та 0,3..0,7 відповідно, можливо отримати такі необхідні розміри заготовки, як початковий діаметр заготовки ($D_{заг}$) та довжина шатунної шийки (B). Також можливо розрахувати необхідні $h_{вн}$ та $b_{інст}$ для

отримання заданих розмірів $d_ш$ та Н. На рисунку 4.5 зображено форму поковки після відковування шатунної шийки, та основні геометричні розміри поковки.

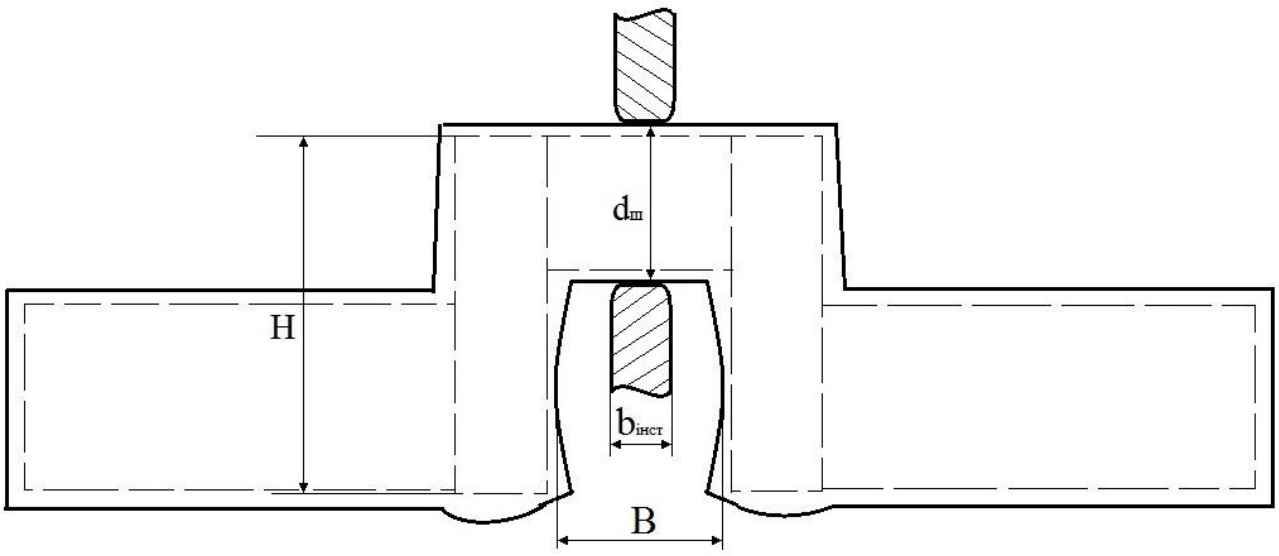


Рисунок 4.5 – Форма поковки та її основні геометричні параметри

Для визначення характерних геометричних параметрів поковки необхідно застосувати наявні графічні залежності (рис. 4.6 – 4.9) формозміни металу при куванні шатунної шийки.

На основі викладених рекомендацій по технологічній придатності схеми кування колінчастого валу з отриманням шатунної шийки, була розроблена технологічна інструкція по застосуванню даної схеми на виробництві. В ній приведено опис вдосконаленого технологічного процесу виготовлення поковок колінчастих валів при застосуванні тонких бойків для отримання шатунної шийки колінчастого валу, в якій немає необхідності закриття коліна валу напуском. Також розглянуто отримання можливих типорозмірів колінчастих валів, тобто за графічними залежностями (рис. 4.6 – 4.9) відношення параметрів готового виробу повинне знаходитися в інтервалі $d_ш/H = 0,35..0,82$, а відношення $B/H = 0,2..1,12$.

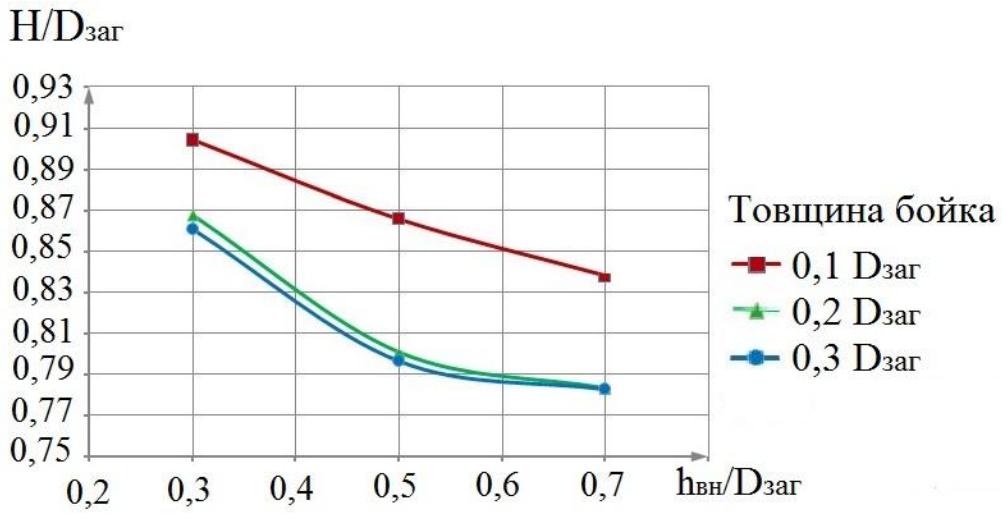


Рисунок 4.6 – Залежність величини утяжини (H) від параметрів кування

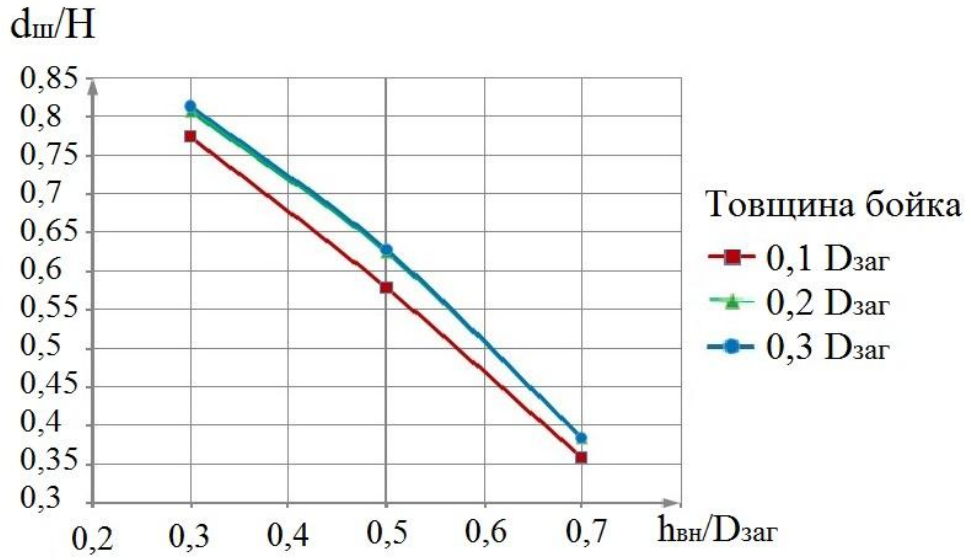


Рисунок 4.7 – Залежність співвідношення діаметру шатунної шийки ($d_ш$) та величини утяжини (H) від параметрів кування

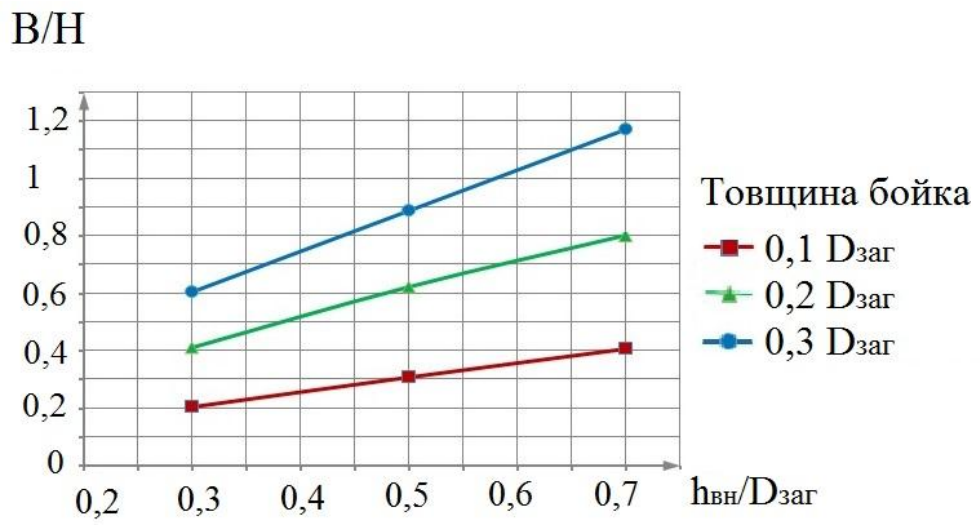


Рисунок 4.8 – Залежність співвідношення довжини шатунної шийки (B) та величини утяжини (H) від параметрів кування

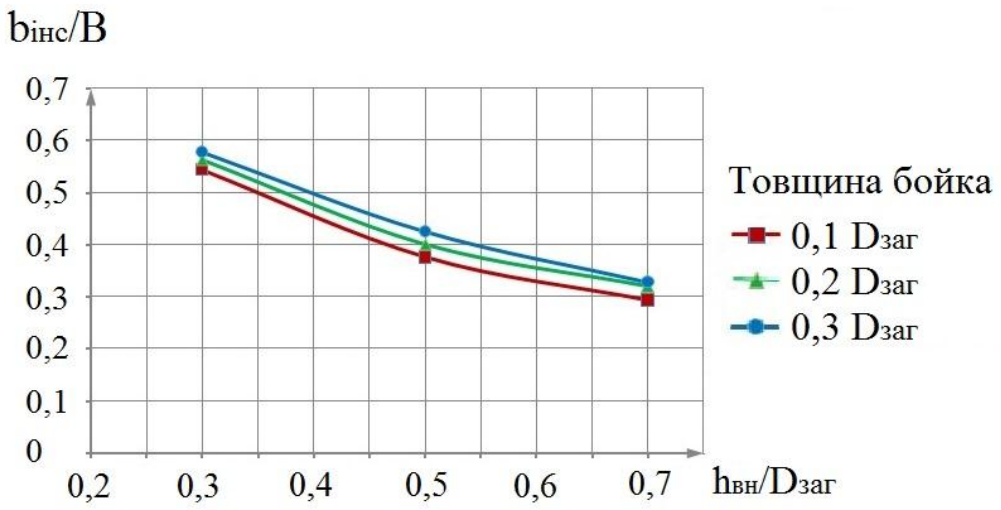


Рисунок 4.9 – Залежність співвідношення товщини деформуючого інструменту ($b_{інс}$) та довжини шатунної шийки (B) від параметрів кування

4.4 Технологічна інструкція по застосуванню тонкого деформуючого інструменту при виготовленні поковок колінчастих валів

Технологічне застосування розробленої схеми кування обумовлено типорозмірами колінчастих валів, які можливо отримати за цією схемою. До

типорозміру колінчастого валу відносяться такі геометричні розміри: довжина шатунної шийки (В); товщина інструменту ($b_{інс}$); діаметр шатунної шийки ($d_ш$); ефективний діаметр коліна (Н). Ескіз поковки, яку можливо отримати за вдосконаленою технологією, зображено на рисунку 4.10.

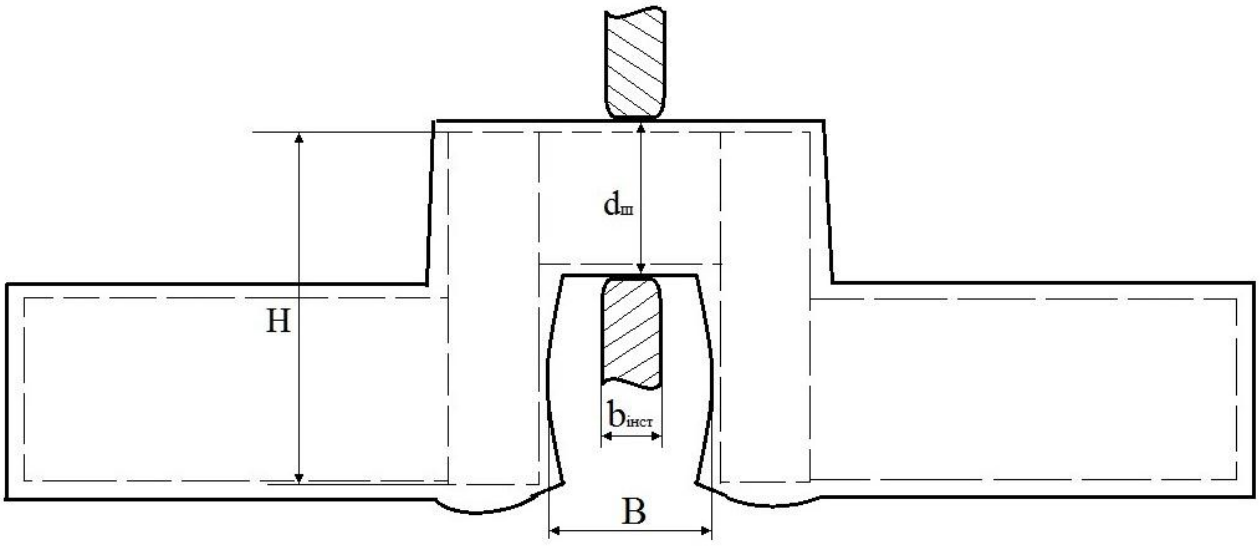


Рисунок 4.10 – Ескіз поковки при застосуванні розробленої схеми кування

На рис. 4.10 приведено основні розміри заготовки після деформації. Задаючи начальні параметри, тобто діаметр шатунної шийки та висоту коліна, можна визначити їх зміну після деформування. При застосуванні тонкого деформуючого інструменту з товщиною в інтервалі 0,1..0,3 $D_{заг}$ та при глибині його вдавлювання в інтервалі 0,3..0,7 $D_{заг}$, можливо отримати необхідні кінцеві розміри поковки (В, Н, $d_ш$). Для цього необхідно на основі кінцевих розмірів поковки, а саме висоти коліна та діаметра шатунної шийки (Н та $d_ш$), з урахуванням величини припуску, визначити по наявних графіках (рис. 4.6 – 4.9) необхідний початковий діаметр заготовки ($D_{заг}$), товщину деформуючого інструменту ($b_{інс}$), необхідну глибину вдавлювання бойка в заготовку ($h_{вн}$) та довжину отримуваної шатунної шийки (В).

Схема використання графічних залежностей на рис. 4.6-4.9, для розрахунку операцій кування колінчастого валу по вдосконаленій технології

для отримання шатунної шийки вільним куванням, зображено на блок-схемі на рисунку 4.11.

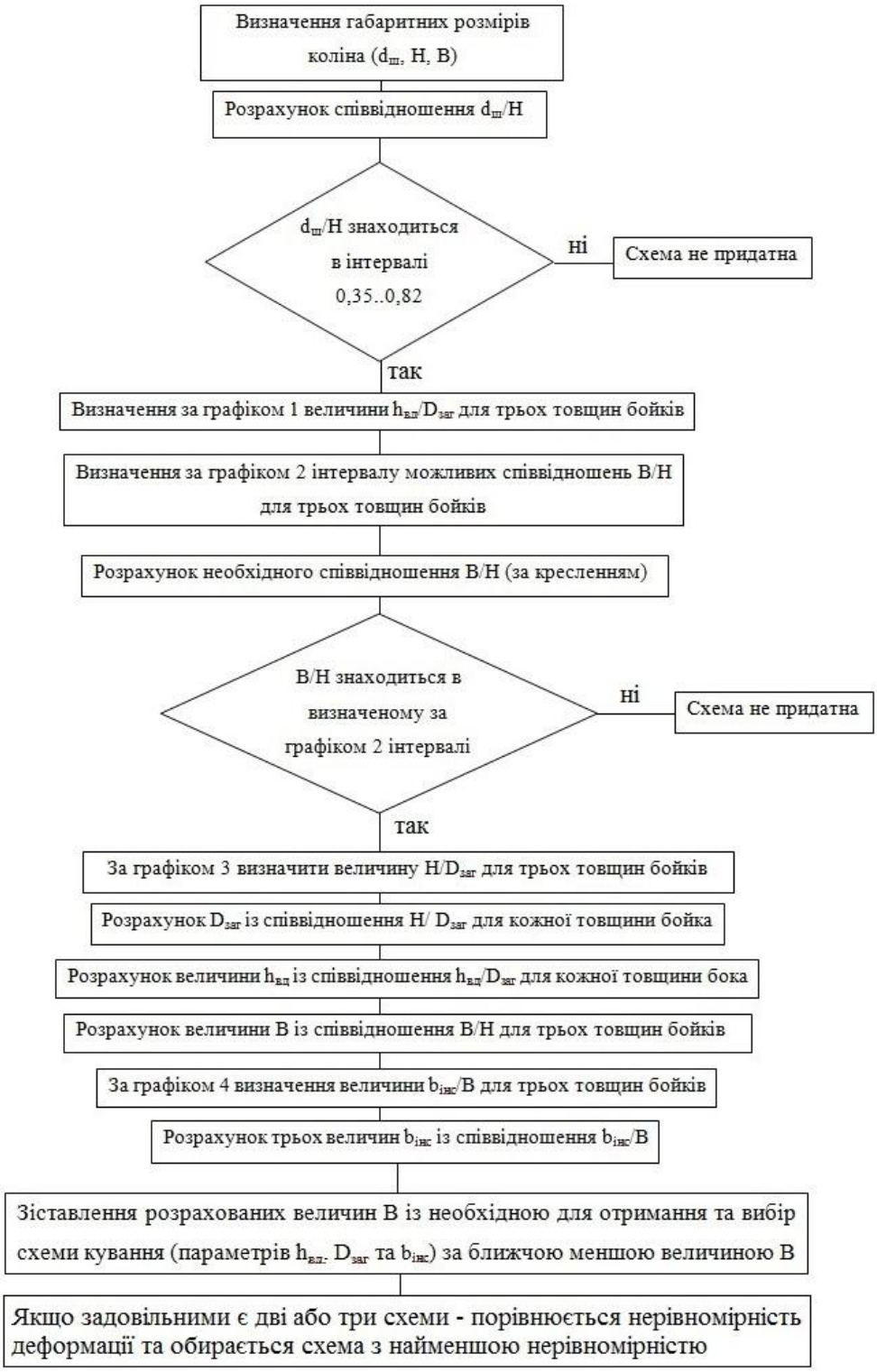


Рисунок 4.11 – Блок-схема послідовності дій при розрахунку параметрів кування

Дана блок-схема має два блоки, які відповідають за визначення придатності даної схеми для кування колінчастого валу з відповідними типорозмірами, тобто якщо співвідношення діаметра шатунної шийки на діаметра коліна готової деталі, з урахуванням припуску, не знаходиться в інтервалі 0,35..0,82 – то розроблена схема кування не придатна. Якщо це співвідношення знаходиться в даному інтервалі, то перевіряється співвідношення інших величин, а саме довжини шатунної шийки на діаметра коліна. Якщо це співвідношення знаходиться в інтервалі 0,2..1,18 – то схема придатна, і можливий розрахунок усіх інших параметрів кування.

Приклад розрахунку:

Необхідно отримати поковку колінчастого валу, зображеного на рисунку 4.12.

Для отримання даної деталі, по величині H = 710 мм та $d_ш$ = 440 мм, отримуємо співвідношення $d_ш$\H = 0,62. По рис. 4.6 визначаємо величини відношення $h_{вн}$\$D_{заг}$. В даному випадку їх буде три для різних співвідношень $b_{інс}$\ $D_{заг}$.

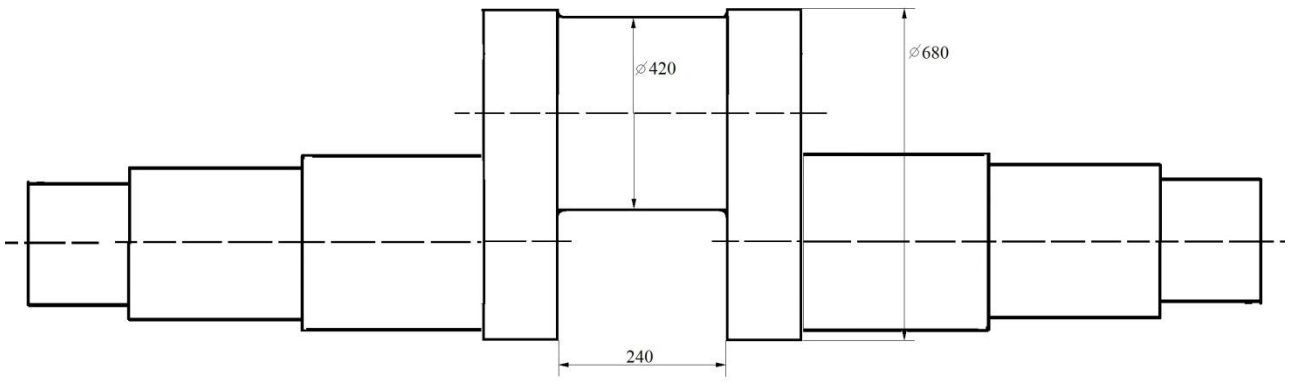


Рисунок 4.12 – Креслення колінчастого валу

Таким чином отримуємо:

$h_{вн}$\$D_{заг}$ = 0,45 для $b_{інс}$\ $D_{заг}$ = 0,1;

$h_{вн}$\$D_{заг}$ = 0,49 для $b_{інс}$\ $D_{заг}$ = 0,2;

$h_{вн}$\$D_{заг}$ = 0,49 для $b_{інс}$\ $D_{заг}$ = 0,3.

Далі, знаючи величину $h_{вн}\backslash D_{заг}$, по графіку на рис. 4.5 визначаємо співвідношення $H\backslash D_{заг}$. Отримуємо:

$H\backslash D_{заг} = 0,87$ для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,1$;

$H\backslash D_{заг} = 0,8$ для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,2$;

$H\backslash D_{заг} = 0,8$ для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,3$.

Також, по графіку на рис. 4.7 визначаємо величину $B\backslash H$, яка складає:

$B\backslash H = 0,3$ для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,1$;

$B\backslash H = 0,61$ для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,2$;

$B\backslash H = 0,87$ для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,3$.

За допомогою графіку на рис. 4.8 визначаємо співвідношення $b_{інс}\backslash B$, яке складає:

$b_{інс}\backslash B = 0,41$ для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,1$;

$b_{інс}\backslash B = 0,4$ для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,2$;

$b_{інс}\backslash B = 0,43$ для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,3$.

Таким чином, знаючи величину (H), із отриманих співвідношень вираховуємо необхідні параметри процесу та геометрію заготовки після деформування. Із співвідношення $H\backslash D_{заг}$ визначаємо початковий діаметр заготовки ($D_{заг}$), який в даному випадку для різних величин $b_{інс}\backslash D_{заг}$ складає:

$D_{заг} = 812$ мм, для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,1$;

$D_{заг} = 884$ мм, для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,2$;

$D_{заг} = 889$ мм, для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,3$.

Із співвідношення $h_{вн}\backslash D_{заг}$, знаючи $D_{заг}$ вираховуємо величину $h_{вн}$, яка складає:

$h_{вн} = 372$ мм, для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,1$;

$h_{вн} = 443$ мм, для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,2$;

$h_{вн} = 449$ мм , для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,3$;

Із співвідношення $B\backslash H$, знаючи величину H, вираховуємо величину B, яка складає:

$B = 217$ мм, для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,1$;

$B = 433$ мм, для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,2$;

$B = 618$ мм, для $b_{інс}\backslash D_{заг} = 0,3$;

Далі необхідно визначити, яка з даних схем є підходящою. Для цього робиться співставлення отриманої розрахункової довжини шатунної шийки (В) із довжиною шатунної шийки готового виробу, з урахуванням припуску та в сторону меншого значення. Таким чином підходящою схемою є кування при використанні бойка товщиною 0,1 $D_{заг}$, так як вона задовольняє необхідну довжину шатунної шийки готового виробу (рис. 4.12). На рисунку 4.13 зображено кінцеву поковку колінчастого валу після отримання шатунної шийки куванням тонкими бойками, а також після протягування опорних шийок валу.

Також із співвідношення $b_{інс}$\ В, або $b_{інс}$\ $D_{заг}$, знаючи розраховані величини (В) або ($D_{заг}$), отримуємо необхідну товщину бойка для отримання заданих розмірів коліна валу. Величина товщини бойка складає $b_{інс}$ = 90 мм.

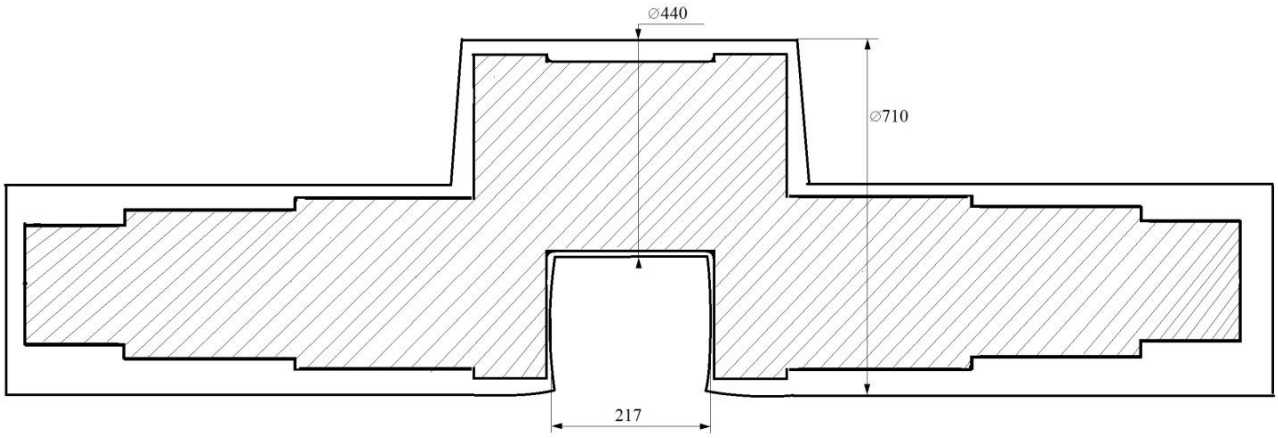


Рисунок 4.13 – Поковка колінчастого валу після кування за розробленою схемою

Таким чином, для отримання поковки колінчастого валу із висотою коліна Н = 710 мм, діаметром шатунної шийки $d_ш$ = 440 мм, та довжиною шатунної шийки В = 240 мм, необхідно взяти заготовку з діаметром $D_{заг}$ = 812 мм, бойок з товщиною $b_{інс}$ = 90 мм, та вдавлювати бойок в заготовку на першому етапу кування на глибину $h_{вн}$ = 372 мм.

4.5 Висновки до розділу 4

Була вдосконалена технологія виготовлення поковок колінчастих валів з отриманням шатунної шийки на основі аналізу переваг та недоліків існуючих технологічних схем та методів виготовлення поковок колінчастих валів. Розроблена схема відрізняється від існуючої тим, що в процесі виготовлення, поковки шатунна шийка колінчастого валу виготовляється за допомогою застосування тонкого деформуючого інструменту (бойка) з товщиною 0,1..0,3 $D_{заг}$, а не закривається шаром металу, тобто напуском як в існуючій технології. Інші операції кування в розробленому технологічному процесі ідентичні існуючій технології. Таким чином, послідовність технологічних операцій є наступною: білетування зливка, осаджування, протягування на необхідний діаметр. Приведено дані досліджень, які можливо застосувати при куванні зливка, тобто використання раціональної схеми кування, або зливків із зменшеною прибутковою частиною, для зменшення витрат металу вже на цьому етапі та покращення якості заготовки для подальших операцій кування з використанням «тонких» бойків. Після отримання зі зливка заготовки необхідного діаметру, заготовку розмічають та розташовують на осаджувальній плиті. Далі в заготовку вдавлюється «тонкий» деформуючий інструмент на необхідну глибину, після чого шатунна шийка колінчастого валу деформується двома тонкими бойками за розробленою схемою кантувань. Після того, як буде отримана шатунна шийка, заготовку знову розмічають та відковують опорні шийки, так, як це робиться в існуючій технології.

В даному розділі дисертаційної роботи також розглянуто технологічну застосовність розробленої схеми виготовлення поковок колінчастих валів з отриманням шатунної шийки вільним куванням. Описано основні параметри процесу, форму заготовки до та після деформування. Представлено графічні залежності, по яких можливий розрахунок зміни основних геометричних параметрів в процесі деформування, для отримання необхідних розмірів виробу. Наведено приклад розрахунку технологічного процесу виготовлення поковки колінчастого валу за розробленою схемою. Для цього, взявши за основу креслення готової деталі,

призначено припуски на діаметр коліна та діаметр шатунної шийки. По наявних графіках визначено співвідношення величин, які характеризують формозміну металу, враховуючи необхідні розміри готової деталі. Із розрахованих співвідношень визначено необхідний початковий діаметр заготовки, необхідну товщину деформуючого інструменту та глибину його вдавлювання в заготовку. Таким чином розраховано всі параметри формозміни та процесу кування в цілому.

Розроблена схема зарекомендувала себе краще ніж існуюча схема. Дана розробка була запропонована та впроваджена у виробництво на підприємстві ПрАТ «Дніпропрес Сталь» для проектування технологічних процесів виготовлення поковок колінчастих валів з отриманням шатунної шийки вільним куванням. За даними підприємства ця розробка дозволила за рахунок зниження витрат на кування поковок колінчастих валів та підвищенні якості продукції отримати наступний реальний ефект, а саме: за рахунок зменшення металоємності поковок колінчастих валів (особливо для сталей типу 40ХН2МА) розхід металу знизився на 13,8%; за рахунок отримання шатунної шийки колінчастого валу, яка максимально наближена до готової продукції, відбракування поковок знизилося на 12,4% за рахунок підвищення якості поковок; при деформаційному переділу зливків сталей типу 40ХН2МА за рахунок підвищення якості поковок зменшилася необхідність обдирання поковок, що дозволило зменшити витрати на тону металу на 8,7%. Вказані розробки дозволили підвищити ефективність деформаційного переділу при куванні поковок колінчастих валів.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертаційній роботі приведено узагальнення та нове рішення наукової задачі, яке виражено у визначенні основних закономірностей формозміни металу при виготовленні поковок колінчастих валів при співвідношенні товщини деформуючого інструменту до діаметра заготовки в інтервалі 0,1..0,3, та отриманні шатунної шийки вільним куванням при співвідношенні її діаметра до діаметра заготовки в інтервалі 0,3..0,7, а також визначенні деформаційних умов максимального наближення геометричних параметрів поковки до готового виробу. Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні технології виготовлення поковок колінчастих валів за формою наближених до готової деталі, що також дозволяє знизити витрати металу при виробництві.

1. З огляду літературних джерел виходить, що сучасна технологія виготовлення поковок колінчастих валів вільним куванням складається в основному з операцій протягування. Отримання шатунної шийки вільним куванням на даний час неможливе, тому зазвичай шатунну шийку закривають ковальським напуском, і таким чином збільшують металоємність виготовлення однієї поковки. При виготовленні поковок, зазвичай, використовують бойки з товщиною, яка перевищує 0,5 від діаметра заготовки, однак це співвідношення досі не було вивчено в інтервалі 0,1..0,3. Таким чином, виконаний в дисертаційній роботі розвиток елементів теорії ковальського виробництва відносно визначення основних закономірностей формозміни металу при куванні шатунної шийки великогабаритного колінчастого валу із співвідношенням товщини інструменту та діаметра заготовки в інтервалі 0,1..0,3, а також визначення деформаційних умов максимального наближення форми поковки до форми готового виробу з метою зменшення витрат металу на виготовлення поковок, актуальний.

2. Вдосконалено метод визначення об’ємної нерівномірності деформації (за Чухлібом В.Л.) для більш точного відображення нерівномірності з урахуванням різниці між середнім значенням коефіцієнту нерівномірності по перерізу поковки та значеннями цього параметру у певних точках перерізу. Вперше при використанні

деформуючого інструменту з відношенням товщини до діаметру заготовки в інтервалі 0,1..0,3, при багаторазових обтисненнях, теоретично, з використанням вдосконаленого методу визначення нерівномірності деформації металу, для певної довжини шатунної шийки визначено кількість обтиснень, кантувань та рівнів ступеню деформації. Методом комп'ютерного моделювання отримано розподілення деформацій, напружень та температур в металі в місці формування шатунної шийки колінчастого валу при вільному куванні. Зокрема проведено теоретичний аналіз деформованого стану металу та визначено закономірності формозміни металу при вдавлюванні «тонкого» деформуючого інструменту в заготовку, а також при подальшому куванні шатунної шийки, що дозволяє обрати варіант схеми деформування з мінімальною нерівномірністю деформацій в місці формування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів

3. В роботі вперше теоретично визначено та експериментально перевірено залежність зміни величини ефективного діаметру коліна від товщини деформуючого інструменту (в інтервалі 0,1..0,3 до діаметру заготовки) та ступеню одиничної обтиснення (в інтервалі 30..70%) при вільному куванні місць формування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів. Побудовані графічні залежності впливу досліджуваних параметрів кування на формозміну металу, при виготовленні поковки колінчастого валу з отриманням шатунної шийки, допомагають прогнозувати розміри отримуваної поковки. Проведений порівняльний аналіз теоретично побудованої (комп'ютерної) моделі та лабораторного експерименту, який довів, що геометричні параметри заготовки при комп'ютерному моделюванні відрізняються від фізичного моделювання не більше, ніж на 10%, що є достатнім для вирішення технічної задачі та свідчить про адекватність побудованої комп'ютерної моделі.

4. На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень була розроблена вдосконалена схема кування великогабаритних колінчастих валів, а також розроблені технологічні рекомендації по застосуванню тонкого деформуючого інструменту для отримання шатунної шийки колінчастого валу за дослідженими схемами кування. Перевірено придатність розробок на

підприємстві. Розроблені технологічні рекомендації впроваджено у виробництво на підприємстві ПрАТ «Дніпропрес Сталь», та використовуються для виготовлення поковок колінчастих валів із зливків та заготовок масою більше 2 тон, при використанні тонких бойків (акт від 22.01.2018 р.). Також отримані в роботі дані використовуються у навчальному процесі а також при виконанні студентами курсових проектів і випускних кваліфікаційних робіт на кафедрі обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова (НМетАУ) (довідка від 21.05.2018 р.).

ЛІТЕРАТУРА

1. Рей Р. І. Ковальсько-штампувальне обладнання. Преси кривошипні / Р. І. Рей, С. С. Монятовський. – Луганськ: СНУ, 2000. – 216 с. – (Навчальне видання).

2. ГОСТ 10158-76 Дизелі та двигуни газові. Вали колінчасті стальні – Введ. 01.01.78.- .:ИПК Издательство стандартов, 1978. – 17 с.: ил.

3. ГОСТ 8479-70 Поковки из конструкционной углеродистой и легированной стали. Общие технические условия. – Введ. 01.01.71.- .:ИПК Издательство стандартов, 1971. – 15 с.: ил.

4. ASTM A456/A456M – 99 «Standard Specification for Magnetic Particle Examination of Large Crankshaft Forgings»

5. ASTM A503/A503M - 01 «Standard Specification for Ultrasonic Examination of Forged Crankshafts»

6. ASTM A983/A983M - 04 «Standard Specification for Continuous Grain Flow Forged Carbon and Alloy Steel Crankshafts for Medium Speed Diesel Engines»

7. Технология компрессоростроения: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки» / Н. А.Ястребова, А. И. Кондаков, В. Д. Лубенец, А. Н. Виноградов. – Москва: Машиностроение, 1987. – 336 с.

8. Кордюков В.П. Свободная ковка на молотах / В.П. Кордюков, Е.Л. Коротких – М.:Машиностроение, 1974. - 209с.

9. Рубин Г.В. Свободная ковка. Методические указания к курсовому проектированию / Г.В. Рубин, Н.А. Чупахина – Москва, 1984. – 41 с.

10. ГОСТ 7062-90 Поковки из углеродистой и легированной стали изготовляемые ковкой на прессах. Припуски и допуски – Введ. 01.01.92.– М.:ИПК Издательство стандартов, 1992. – 35 с.: ил.

11. ГОСТ 7829-70 Поковки из углеродистой и легированной стали изготовляемые ковкой на молотах. Припуски и допуски – Введ. 01.01.71. – М.:ИПК М.:ИПК Издательство стандартов, 1971. – 28 с. : ил.

12. ГОСТ 7505-89 Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски – Введ. 01.01.71. – М.:ИПК Издательство стандартов, 1971. – 28 с. : ил.

13. Сасов В.В и др., Технология автототракторостроения. «Машиностроение», 1968. - 344 с.

14. Володин И.М. Особенности проектирования технологи изготовления поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей / И.М. Володин, В.С. Мартюгин // Обработка материалов давленим. Сборник научных трудов. 2008. - № 1 (19). - С. 196 – 200.

15. Семендий В.И. Прогрессивные технология, оборудование и автоматизация кузнечно-штамповочного производства КамАЗа / В.И. Семендий, И.Л. Акаро, Н.Н. Волосов.- М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

16. Маслов Д.П. Технология автотракторостроения / Д.П. Маслов, Ф.В. Гурин, А.М. Кузнецов, А.М. Васильев.-М.: Машгиз, 1962. – 432 с.

17. Сучков, А. Е. Экономия металла в машиностроении при обработке давлением / А. Е. Сучков. - Минск: Наука и техника, 1971. - 128 с.

18. Семёнов Е.И. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х томах / Е.И. Семёнов (пред.) и др. – М: Машиностроение, 1986. – 592 с., ил.

19. Rut T. Ulepszona metoda TR kucia pojedynczych wykorbień wałów półskładanych do wolnoobrotowych silników Diesla / T. Rut, W. Walczyk // Obróbka Plastyczna Metali t. XIX. - 2008. - №3. - p. 19-33.

20. Rut T. Kucie metodą TR wałów korbowych wysokopręśnych silników średnioi wolnoobrotowych / T. Rut, W. Walczyk // 17th International scientific and technical conference “Design and technology of drawpieces and die stampings”. - 2008. - p. 133-152.

21. W. Walczyk Computer Aided Design of New Forging Technology for Crank Shafts / W. Walczyk, A. Milenin, M. Pietrzyk // Steel research int. 82. 2011. - №3. - p. 187 – 194.

22. Pietrzyk M. Mulitscale and meta modelling – from high accuracy to high efficiency in simulations of metal forming processes / M. Pietrzyk, D. Szeliga // Metal. 23. - 25. 5. 2012, Brno, Czech Republic, EU.

23. Milenin A. Model of curvature of crankshaft blank during the heat treatment after forging / A. Milenina, T. Rec, W. Walczyk, M. Pietrzyk // Procedia Engineering. - 2014. - 81. - p. 498 – 503.

24. Milenin A. Numerical Modeling of Microstructure Evolution During Forging of Crank Shafts / A. Milenin, W. Walczyk, M. Pietrzyk // Steel research international. - 2012. - №8. - p. 808 – 816.

25. Chunli Z. Numerical Simulation of Upset-bending Forging for Heavy Crankshaft / Z. Chunli, C. Zhenshan, S. Dashan // Advanced Materials Research. - 2013. - № 773. - p. 267 - 271.

26. Jianjung W. The Improvement and Finite Element Analysis of Large Crankshaft Forging Process / W. Jainjung, H. Sulan, P. Lu, Z. Yanming // Applied Mechanics and Materials. - 2013. - № 365-366. - p. 561-564.

27. Miao J. Study on bending and upsetting forging 305 marine crankshafts / J. Miao, Z. Shiyan, G. Baofeng, L. Qun // Advanced Materials Research. - 2010. - № 101. - p. 337 - 343.

28. Bing W. Study on deformation coordination in upsetting forging process of the crank of continuous fiber crankshaft for marine / W. Bing, G. Baofeng, J. Miao, Z. Wencheng, Z. Shiyan, Z. Zongyuan // Advanced Materials Research. - 2012. - № 420. - p. 1324 - 1329.

29. Erman Tekkaya A. 60 Excellent Inventions in Metal Forming / A. Erman Tekkaya, W. Homberg, A. Brosius // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. - 2015. - p. 438

30. Computer simulation of technological chain by free forging [Електронний ресурс] / B.Mašek, Z. Nový, D. Kešner, L. Meyer. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/268432694/download.

31. Mašek B. 3d simulace pěchování a prodlužování kovářského ingotu i 45 [Електронний ресурс] / B. Mašek, Z. Nový, D. Kešner – Режим доступу до ресурсу:

https://docplayer.cz/16519172-3d-simulace-pechovani-a-prodluzovani-kovarskeho-ingotu-i-45.html.

32. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочноо производства. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М; Машиностроение, 1976. - 206-219.с.

33. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т./ [Ред. совет: Е.И. Семёнов (пред.) и др.] – М.: Машиностроение, 1985 – Т.1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка/ Под ред. Е.И. Семёнова. - 1985. - 568 с., ил.

34. Sawicki S. Plastometric testing of 20MnB4 and 30MnB4 microadditional cold upsetting steels and C45 and C70 high-carbon steels / S. Sawicki, H. Dyja, A. Kawałek // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 10: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 205 с.

35. Михаличев В.М. Усовершенствование экспериментально-аналитической методики исследования напряженно-деформированного состояния боковой поверхности цилиндрических образцов при осесимметричной осадке / В.М. Михаличев, Ю.В. Добранюк, Е.А. Трач // Наукові праці ВНТУ. - 2011. - №4. - С. 1-8.

36. Охрименко Я.М. Теория процессов ковки. Учеб. Пособие для вузов / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин - М., «Высш. школа», 1977. - 295 с.

37. Жбанков Я.Г. Определение рациональных параметров профилированных заготовок, подвергаемых осадке плоскими плитами / Я.Г. Жбанков, О.Е. Марков, Р.И. Сивак // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. - 2013. - №8. - С. 8-15.

38. Кухарь В.В. Экспериментальные исследования режимов кузнечной протяжки заготовок с обкаткой в комбинированных бойках / В.В. Кухарь, О.В. Василевский // Вестник НТУ «ХПИ». - 2013. - №43. - С. 139-148.

39. Кухарь В.В. Смещенные объемы при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми плитами / В.В. Кухарь, В.А. Бурко // Обработка материалов давлением. - 2008. - №1 (19). - С. 177-182.

40. Алиев И.С. Моделирование кузнечной протяжки в комбинированных бойках несимметричной формы / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. - 2013. - №3 (69). - С. 77-83.

41. Алиева Л.И. Ковка поковок типа валов с продольным сдвигом специальными бойками / Л.И. Алиева, Я.Г. Жбанков, В.Ю. Станков // Вестник «ХПИ». - 2013. - №43. - С. 3-10.

42. Назарьян В.А. Алгоритм назначения режимов ковки при протяжке в вырезных и комбинированных бойках // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка метал лов давленим. - 1997. - №9. - С. 8-11.

43. Назарьян В.А. Оптимизация процесса кузнечной протяжки / В.А. Назарьян, О.М. Маракушина // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка метал лов давленим. - 1998. - №4. - С. 22-30.

44. Назарьян В.А. Расчет напряженого состояния при ковке-протяжке заготовок круглого сечения // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка метал лов давленим. - 1998. - №6. - С. 13-16.

45. Christiansen P. Open die forging of large shafts with porosity defects – physical and numerical modeling / P. Christiansen, J. H. Hattel, N. Bay, L. M. Alves, P. A. F. Martins // Key Engineering materials. - 2013. - № 554-557. - p. 2145 - 2155.

46. Веников В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам енергетики. –М.: Высшая школа, 1966. - 478 с.

47. Веников В. А. Теория подобия и моделирование / В. А. Веников. Г. В. Веников М.: Высшая школа, 1984. - 439 с.

48. Кирпичев В. Л. Беседы о механике / В. Л. Кирпичев. - М.; Л. : Гос. технико-теоретическое изд-во, 1950. - 260 с.

49. Колмогоров В. Л. О пластичности и деформируемости металлов / В.Л. Колмогоров // Кузнечно-штамповочное производство. - 1981. - № 8. - с. 9 - 10.

50. Ильюшин А.А. Основы математической теории термовязкоупругости / А. А. Ильюшин, Б. Е. Победря. - М.: Наука, 1970. – 280 с.

51. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением / В.С. Смирнов - М.: Металлургия, 1973. - 496 с.

52. Чекмарев А. П. Определение истинных пределов текучести стали методом горячего кручения / А. П. Чекмарев, А. П. Качайлов // Прокатное производство: сб. тр. ИЧМ УССР. - 1962. - Т. 16. - С. 198-202.

53. Выдрин В.Н. О параметрах, характеризующих форму очага деформации при прокатке / В. Н. Выдрин // Известия вузов. Черная металлургия. - 1961. - №11. - С. 94- 96.

54. Эйгенсон Л. С. Моделирование / Эйгенсон Л. С. - М.: Советская наука, 1952. - 372 с.

55. Рейнер М. Реология / Рейнер М; [пер. с англ. Н. И. Мапинина]. - М.: Наука, 1965. - 223 с.

56. Ленский В. С. Введение в теорию пластичности / Ленский В. С. - М.: МГУ, 1961. - 245с.

57. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды / Ильюшин А. А. - М.: МГУ, 1990. - 310 с.

58. Шломчак Г. Г. Проблеми сучасного наукового експерименту в обробці металів тисненям / Г. Г. Шломчак // Вісті Академії інж. наук України. - 1995. - № 3. - С. 79 - 89

59. Шломчак Г.Г. Новое направление в экспериментальной механике - пластическое формоизменение реологически сложных металлов / Г. Г. Шломчак // Теория и практика металлургии. - 1997. - № 1. - С. 40-45.

60. Шломчак Г. Г. Основи наукових досліджень / Шломчак Г. Г. // Дніропетровськ: Пороги. - 2005. - 159 с.

61. Степанский Л. Г. Оценка стойкости штампов для горячей штамповки по критерию пластического смятия/ Л.Г. Степанский, И.В. Заруцкий // Кузнечно-штамповочное производство. — 1988. - №12. — с.1-3.

62. Шломчак Г. Г. Реологические классы материалов / Г. Г. Шломчак // Материалы II международной конференции «Материалы для строительства». - 1993. - С. 69-70.

63. Шломчак Г. Г. Установление закономерностей деформирования металлов со сложной реологией методами физического моделирования: дис. ... доктора техн. наук : 05.03.05 / Шломчак Георгий Григорьевич. - Днепропетровск., 2000. - 343 с.

64. Чухліб В.Л. Дослідження напружено-деформованого стану при осадці сталей та сплавів / В.Л. Чухліб, Є.С. Клемешов // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2015. - №5. - С. 34-40.

65. Чухлеб В.Л. Исследование неравномерности распределения деформаций при протяжке заготовок из сплава ЭИ698 при переменных параметрах предварительной осадки / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, Х. Дыя // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. Collectiv monograph. – Czenstachowa, Polska. - 2016. - №56. - P. 232-238.

66. Чухлеб В.Л. Исследование ковки титановых сплавов на гидравлических прессах в условиях ООО «Днепропресс Сталь» / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дыя // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. Запоріжжя: ЗНТУ. - 2016. - №2. С. 18-22.

67. Макаров Е.Г. Теория пластичности для инженеров / Л.М. Качанов – Санкт-Петербург: БГТУ-Военмех, 2011. – 85 с.

68. Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов - М.: МГУ, 1969. – 420 с. с илл.

69. Клемешов Є.С. Дослідження формозміни заготовки при вдавлюванні вузького бойка / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 29 червня – 1 липня 2017 р. Матеріали конференції. – Київ, КПІ:2017. – С. 106 – 107.

70. Клемешов Е.С. Исследование формоизменения металла в процессе ковки шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ. - 2017. - №35. - С. 21-24.

71. Клемешов Е.С. Исследование формоизменения металла в процессе ковки шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // IX Международная научно-техническая конференция «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в

машиностроении и металлургии», 22-24 листопада 2017 р. Матеріали конференції. – Харків, ХПІ:2017.

72. Клемешов Є.С. Дослідження видовження шатунної шийки при куванні тонкими бойками / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», 29 травня - 02 червня 2018 р. Матеріали конференції. – Залізний Порт.

73. Клемешов Є.С. Дослідження впливу параметрів кування на форму поковки колінчастого валу та впровадження розробок на ПрАТ «Дніпропрес Сталь» / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб, Є.І. Шифрін // Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА. - 2017. - №. 2 (45) - С. 54 - 63.

74. ГОСТ 11424-75 Инструмент кузнечный для ручных и молотовых работ. Пережимки треугольные. Конструкция и размеры – Введ. 01.01.77.– М.:ИПК Издательство стандартов, 1982. – 2 с.: ил.

75. Клемешов Є.С. Дослідження процесу кування опорних шийок та його впливу на форму коліна / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 19-22 червня 2018 р. Матеріали конференції. – Київ, НТУУ КПІ:2018.

76. Клемешов Е.С. Анализ неравномерности распределения деформаций при ковке шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства», 25-26 квітня 2018 р. Матеріали конференції. – Кременчук, КрНУ:2018.

77. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов справонник / Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. - М.: Металлургия, 1983. - 352 с.

78. Авторское свидетельство СССР №1230739, кл. В 21 К 1/08. Способ изготовления коленчатых валов и устройство для его осуществления / Г.А. Лимонин, В.М. Максименко. - № 3714649/ 25 – 27; заявл. 02.01.1984; опубл. 15.05.1986; Бюл. № 18. – 5 с.

79. Авторское свидетельство СССР №1773544, кл. В 21 К 1/08. Способ ковки эксцентриковых валов / Ю.Н. Станков, С.Н. Солошенко, В.В. Кубай, В.И. Карнаух, В.Н. Ефимов. - № 4900359/ 25 – 27; заявл. 08.01.1991; опубл. 07.11.1992; Бюл. № 41. – 4 с.

80. Соколов Л.Н. Атлас технологических процессов ковки крупных поковок: учеб. пособие для студентов специальности «Обработка металлов давлением» по дисциплине «Технология ковки» Ч. 3 / Л.Н. Соколов, И.С. Алиев, О.Е. Марков, Л.И. Алиева – Краматорск: ДГМА, 2007. - 172 с.

81. Клемешов Е.С. Анализ путей повышения качества поковок коленчатых валов с применением осадки-протяжки слитка / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА. - 2016. - №1 (42). - С. 84 - 91.

82. Авторское свидетельство СССР №940983, кл. В 21 J 1/04. Способ ковки крупных слитков / В.В. Псарев, Н.П. Портняга, П.П. Кальченко, В.О. Кононенко. - № 2968730/ 25 – 27; заявл. 06.08.1980; опубл. 07.07.1982; Бюл. № 25. – 3 с.

83. Чухлеб В.Л. Промышленное внедрение ресурсосберегающего процеса ковки с рациональным режимом формоизменения уменьшенной прибыльной части слитков из корозионностойких сталей / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, А.А. Фролов, Х. Дыя // Обработка материалов давлением. 2017. №1 (44). С. 123-130.

84. Чухлеб В.Л. Оптимизация технологии ковки поковок гладких валов из дуплекс-стали в условиях ООО «Днепропресс Сталь» / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дыя // Вестник НТУ «ХПИ». Харків: НТУ. - 2016. - №31. - С. 75 - 81.

85. Спосіб виготовлення поковок колінчастих валів / В.Л. Чухліб, Є.С. Клемешов. (заявка № а201709944).

ДОДАТКИ

Додаток А

Основний зміст роботи відображено у наступних публікаціях:

1. Клемешов Е.С. Исследование формоизменения металла в процессе ковки шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ. - 2017. - №35. - С. 21-24.

2. Клемешов Є.С. Дослідження впливу параметрів кування на форму поковки колінчастого валу та впровадження розробок на ПрАТ «Дніпропрес Сталь» / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб, Є.І. Шифрін // Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА. - 2017. - №. 2 (45) - С. 54 - 63.

3. Клемешов Е.С. Анализ путей повышения качества поковок коленчатых валов с применением осадки-протяжки слитка / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА. - 2016. - №1 (42). - С. 84 - 91.

4. Чухліб В.Л. Дослідження напружено-деформованого стану при осадці сталей та сплавів / В.Л. Чухліб, Є.С. Клемешов // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2015. - №5. - С. 34-40.

5. Чухлеб В.Л. Промышленное внедрение ресурсосберегающего процеса ковки с рациональным режимом формоизменения уменьшенной прибыльной части слитков из корозионностойких сталей / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, А.А. Фролов, Х. Дыя // Обработка материалов давлением. 2017. №1 (44). С. 123-130.

6. Чухлеб В.Л. Исследование ковки титановых сплавов на гидравлических прессах в условиях ООО «Днепропресс Сталь» / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дыя // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. Запоріжжя: ЗНТУ. - 2016. - №2. С. 18-22.

7. Чухлеб В.Л. Оптимизация технологии ковки поковок гладких валов из дуплекс-стали в условиях ООО «Днепропресс Сталь» / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дыя // Вестник НТУ «ХПИ». Харків: НТУ. - 2016. - №31. - С. 75 - 81.

8. Чухлеб В.Л. Исследование неравномерности распределения деформаций при протяжке заготовок из сплава ЭИ698 при переменных параметрах предварительной осадки / В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, Х. Дыя // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. Collectiv monograph. – Czenstachowa, Polska. - 2016. - №56. - S. 232-238.

9. Клемешов Є.С. Дослідження формозміни заготовки при вдавлюванні вузького бойка / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 29 червня – 1 липня 2017 р. Матеріали конференції. – Київ, КПІ:2017. – С. 106 – 107.

10. Клемешов Е.С. Исследование формоизменения металла в процессе ковки шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // IX Международная научно-техническая конференция «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии», 22-24 листопада 2017 р. Матеріали конференції. – Харків, ХПІ:2017.

11. Клемешов Е.С. Анализ неравномерности распределения деформаций при ковке шатунной шейки коленчатого вала / Е.С. Клемешов, В.Л. Чухлеб // Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства», 25-26 квітня 2018 р. Матеріали конференції. – Кременчук, КрНУ:2018.

12. Клемешов Є.С. Дослідження видовження шатунної шийки при куванні тонкими бойками / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», 29 травня - 02 червня 2018 р. Матеріали конференції. – Залізний Порт.

13. Клемешов Є.С. Дослідження процесу кування опорних шийок та його впливу на форму коліна / Є.С. Клемешов, В.Л. Чухліб // Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 19-22 червня 2018 р. Матеріали конференції. – Київ, НТУУ КПІ:2018.