

¹А.В. Волокитин, ¹А.Б. Найзабеков, ¹И.Е. Волокитина*, ²Е.А. Панин,
³Е.И. Кульдеев, ³Г.Ж. Молдабаева, ⁴Д.В. Куис

¹Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан

²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

³Satbayev University, Алматы, Казахстан

⁴Белорусский государственный технологический университет, Беларусь

*e-mail: irinka.vav@mail.ru

КОНСТРУКЦИЯ ШТАМПА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Аннотация. Была осуществлена разработка специальной конструкции штампа, позволяющего реализовать процесс интенсивной пластической деформации путем кручения под высоким давлением для деформирования кольцевых заготовок, которые будут являться исходным материалом для создания высокопрочных поршневых колец. Особенностью конструкции штампа является обеспечение кручения деформирующего инструмента при неизменном прямолинейном движении пуансона прессы за счет составного деформирующего инструмента, включающего в себя как блоки перемещения, так и вращения. С помощью полученной геометрии было проведено компьютерное моделирование данного процесса в программе Deform с целью оценки возможности стабильного протекания процесса. В качестве материала заготовки была выбрана нержавеющая сталь аустенитного класса AISI-316. Было рассмотрено возникающее усилие деформирования на первых двух циклах. На первом цикле усилие было равно 464 кН, на втором цикле значение усилия было около 1200 кН. Полученные значения являются вполне адекватными, что говорит о возможности многоциклового деформирования.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, кручение под высоким давлением, конструкция штампа, моделирование.

Одной из основных задач физического материаловедения является обеспечение требуемого сочетания технологических и эксплуатационных свойств современных материалов. Механические свойства зависят от таких структурных параметров, как размеры зерен, плотность дислокаций, типы межкристаллитных границ. Наиболее простым и эффективным способом получения материалов с ультрамелкозернистой структурой является термомеханическая обработка (ТМО), основанная на сочетании больших пластических деформаций и отжига [1–3]. Варьируя режимы ТМО, можно получать структуры с различными параметрами в результате развития тех или иных рекристаллизационных процессов, что позволяет за счет микроструктурного дизайна управлять свойствами материалов в широких пределах [4–6].

Методы интенсивного пластического деформирования, в отличие от традиционных методов обработки металлов давлением, направленных преимущественно на формообразование, используются для значительного изменения структуры, фазового состава, физических и механических свойств. В результате ИПД в металлических материалах на порядки возрастают протяженности границ зерен и субзерен, заметно изменяется статическая и динамическая дилатация атомов кристаллической решетки. Благодаря этому во много раз повышаются прочностные характеристики металлов при сохранении достаточно высоких пластических свойств [7–10]. Наиболее исследуемым из всех методов ИПД является метод кручения под высоким давлением. Данный метод был разработан П.У. Бриджменом (Нобелевская премия по физике в 1946 г.) в 1950-х гг. и в дальнейшем развит в работах Л.Ф. Верещагина, Н.С. Ениколопяна, В.Е. Панина и других ученых из России, США, Австрии, Японии и Китая. Значительный вклад в развитие современных представлений о структурных превращениях в металлах и сплавах при таком сложном воздействии внесли В.А. Теплов, А.Н. Тюменцев, В.Д. Бланк, В.П. Пилюгин, В.В. Сагарадзе, И.Г. Бродова, М.В. Дегтярев, Р.З. Валиев и др.

Кручение под высоким давлением (КВД), как эволюция наковальни Бриджмена, было одним из первых способов получения объемных УМЗ и наноструктурных образцов, позднее развитых в работах [12-14]. Этот метод еще называют кручение под гидростатическим давлением (КГД). Образцы в форме дисков диаметром 10-20 мм и толщиной 0,3-1 мм деформируют кручением в условиях высокого приложенного гидростатического давления. Образец помещается внутрь полости, выполненной в нижнем бойке, и к нему прилагается гидростатическое давление величиной от 1 до 10 ГПа. Пластическая деформация кручением образца осуществляется за счет вращения одного из бойков. Поворот подвижной наковальни на определенный угол позволяет достичь различной степени деформации.

Как известно, в процессе кручения под высоким давлением движение деформирующего инструмента состоит из двух типов: поступательного и вращательного. В качестве рабочего механизма для реализации данного способа идеально подходят прессы, позволяющие создать высокое гидростатическое давление при сжатии. Однако главной трудностью является необходимость осуществления операции кручения вдоль оси заготовки. Для этого необходимо сообщить определенный крутящий момент деформирующему инструменту, что зачастую является невозможным из-за особенностей конструкции большинства прессового оборудования. Поэтому единственным возможным вариантом в этом случае остается обеспечение кручения деформирующего инструмента при неизменном прямолинейном движении пуансона прессы. Решение этой технической задачи может реализовано на практике только при наличии составного деформирующего инструмента, включающего в себя как блоки перемещения, так и вращения [15-18].

На рисунке 1 представлены чертеж и трехмерная модель верхнего бойка, которому сообщается поступательное движение от прессы. На нижней грани созданы 4 периодических выточки спиральной формы. При этом в центре верхнего бойка предусмотрено цилиндрическое отверстие для штока деформирующего элемента и обеспечения соосности обеих деталей.

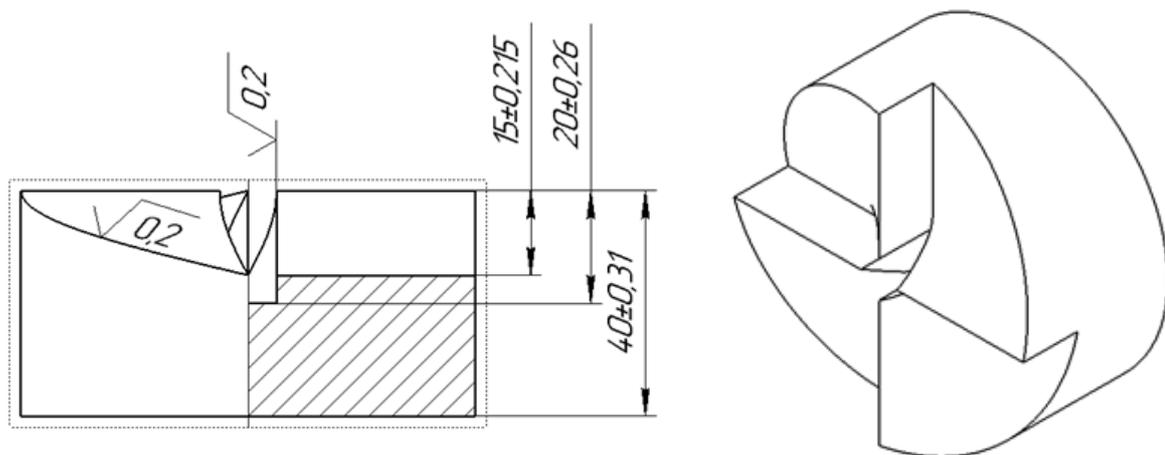


Рисунок 1. Верхний боек

На рисунке 2 представлена трехмерная модель нижнего бойка, которому сообщается крутящий момент от поступательного движения пуансона. За счет трения скольжения между двумя спиральными поверхностями данный элемент вынужденно проворачивается вокруг своей оси до смыкания вертикальных участков спиральных каналов.

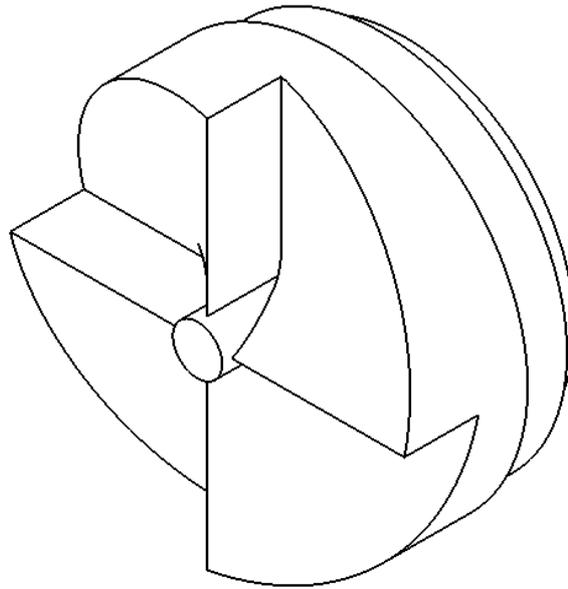


Рисунок 2. Нижний боек

Нижний боек имеет несколько ступеней. Данное конструктивное решение является необходимым, поскольку в данном случае речь идет о деформировании кольцевой заготовки, а не дисковой. Первый переход (вторая промежуточная ступень) обеспечивает своей боковой гранью соприкосновение с боковой гранью стакана, в который закладывается заготовка (рис. 3). Второй переход (третья нижняя ступень) обеспечивает контакт с заготовкой по ее внутреннему радиусу, попутно полностью замыкая ее поперечное сечение.

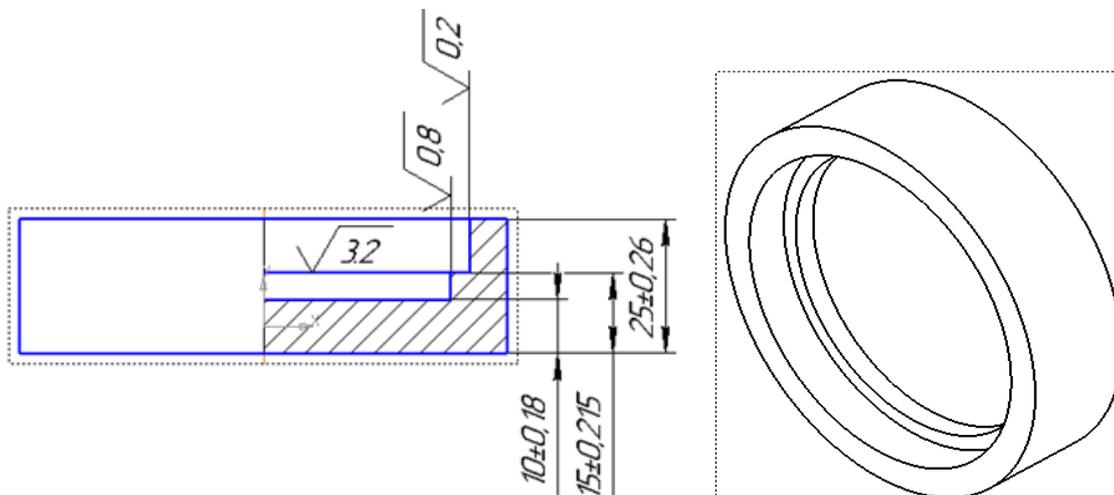


Рисунок 3. Чертеж и модель нижней матрицы

В соответствии с этим принципом, внутренняя форма стакана также должна иметь ступенчатую форму. Ширина ступени должна соответствовать ширине обрабатываемой кольцевой заготовки.

Трехмерная геометрия всех деталей создавалась в программе КОМПАС-16 (рис.4), с последующим сохранением в формат STL.

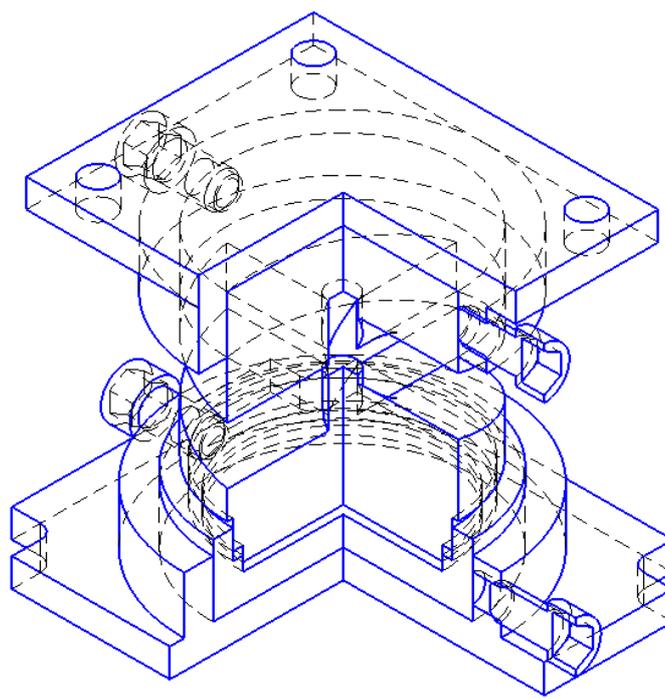


Рисунок 4. Результирующая модель в Deform

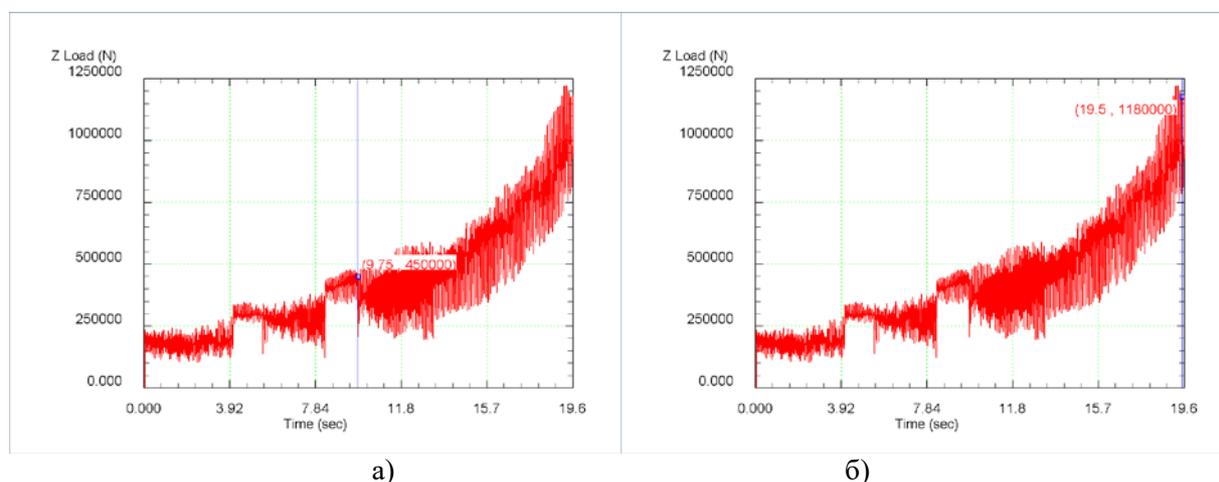
В качестве материала заготовки была выбрана нержавеющая сталь аустенитного класса AISI-316. Деформирование проводилось при комнатной температуре. Скорость движения пуансона составляла 1,5 мм/сек. Для осуществления деформации сдвига в данном процессе необходима высокая степень сцепления заготовки с инструментом. Поэтому на контакте заготовки со стаканом и деформирующим элементом было установлено значение коэффициента трения, равное 0,45. Деформирующему элементу никаких значений скорости не сообщалось. Вместо этого на оси цилиндрического штока устанавливалось следующее граничное условие: свободное перемещение в вертикальном направлении; перемещение оси по двум другим направлениям было отключено. Такая фиксация соответствует тому, что шток попадает в цилиндрический вырез пуансона и может в нем свободно перемещаться и вращаться.

Также для всех спиральных поверхностей деформирующего элемента было разрешено вращение вокруг данной оси. При этом величина угловой скорости вращения также не была задана, вместо этого было установлено крайне малое значение крутящего момента 10^{-6} Н*мм со знаком, обратным предполагаемому направлению вращения. Данный способ является универсальным, когда требуется задать косвенное вращение от действия сил трения. На контакте двух спиральных поверхностей было установлено малое значение коэффициента трения, равное 0,1, которое в реальных условиях обеспечивается низким уровнем шероховатости обеих поверхностей и применением смазки.

Для оценки возможности стабильного протекания процесса предварительно было проведено моделирование двух циклов деформирования, т.е. после того, как вертикальные участки пуансона и деформирующего элемента соприкасались, пуансон поднимался вверх, вся остальная конструкция проворачивалась на 2-3 градуса в обратную сторону для обеспечения торцевого захвата. После этого процесс деформирования повторялся.

Самый простой способ оценить реальную возможность реализации любого разрабатываемого процесса - это учесть возникающее усилие деформации, поскольку этот параметр определяет реальные деформационные возможности используемого механического оборудования.

На рис. 5 показаны графики усилия для двух циклов деформации. Поскольку холодная деформация неизбежно приводит к упрочнению обрабатываемого металла, уровень усилия при увеличении циклов обработки постоянно увеличивается, и максимальное значение усилия для конкретного цикла получается в конце взаимного скольжения спиральных поверхностей. В первом цикле было получено около 464 кН, во втором - около 1200 кН. Эти значения вполне адекватны, учитывая сложную схему нагружения и достаточно прочный исходный материал.



а – на первом цикле; б – на втором цикле

Рисунок 5. Усилие деформирования

Выводы. Осуществлена разработка специальной конструкции штампа, позволяющего реализовать процесс интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением для деформации кольцевых заготовок, которые будут исходным материалом для создания высокопрочных поршневых колец. Полученные в результате моделирования в программном комплексе Deform значения вполне адекватны, что свидетельствует о возможности многоциклового деформации в новой конструкции штампа для реализации кручения под высоким давлением.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP08856353).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Патент РФ № 2364660, МПК C22F 1/18, B21J 5/100. Способ получения ультрамелкозернистых заготовок из титановых сплавов / Латыш В.В., Половников В.М., Кандаров В.В. и др. // Оpubл. 20.08.09.
- [2] Патент РФ №2393936, МПК C22F 1/18, B21J 5/06. Способ получения ультрамелкозернистых заготовок из металлов и сплавов / В.А. Шундалов, В.Ю. Иванов, В.В. Латыш, и др. // опубл. 10.07.10.
- [3] Volokitina I.E., Kurapov G.G. Effect of Initial Structural State on Formation of Structure and Mechanical Properties of Steels Under ECAP // Metal Science and Heat Treatment. 2018. V. 59(11-12). P. 786-792.
- [4] Исламгалиев Р.К., Нестеров К.М., Валиев Р.З. Структура, прочность и электропроводность медного сплава системы Cu–Cr, подвергнутого интенсивной пластической деформации // ФММ. 2015. № 116. С. 219-230.
- [5] Lezhnev S., Nayzabekov A., Volokitin A., Volokitina I. New combined process "pressing-drawing" and impact on properties of deformable aluminum wire // Procedia Engineering. 2014. № 81. С.1505 – 1510.
- [6] Литовченко И.Ю., Аккузин С.А., Полехина Н.А., Тюменцев А.Н. Влияние термомеханических обработок на формирование субмикроструктурных состояний и механические свойства метастабильной аустенитной стали // Письма о материалах. 2016. № 4 (24). С. 290–293.

- [7] Лю Цзюньвей, Оуян Цзыпен, Лу Шигиан и др. Влияние РКУП по маршрутам Вс и С на микроструктуру и температуру мартенситного превращения сплава NITiNB // *МиТОМ*. 2017. № 1(739). С. 48-53.
- [8] Lezhnev S. N., Volokitina I. E., Volokitin A. V. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of Steel during Pressing–Drawing // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. № 118(11). С. 1167–1170.
- [9] Frint P., Wagner M.F.-X., Weber S. et al. An experimental study on optimum lubrication for large-scale severe plastic deformation of aluminum-based alloys // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. V.239. P. 222–229.
- [10] Kurapov G.G., Orlova E.P., Volokitina I.E., Turdaliev A. Plasticity as a physical-chemical process of deformation of crystalline solids // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016. V. 51. P. 451-457.
- [11] Zhilyaev, A.P. Evolution of microstructure and microtexture in fcc metals during high-pressure torsion / A.P. Zhilyaev, T.R. Mcnelley, T.G. Langdon // *Journal of Materials Science*. – 2007. – V.42, N5. – P.1517-1528.
- [12] В.П.Пилюгин Л.М. Воронова, М.В. Дегтярев, Т.И. Чащухина. Особенности измельчения структуры чистого железа при низкотемпературной деформации под высоким давлением // *Деформация и разрушение материалов*. – 2011. – N.1. – С.26-30.
- [13] Вайнблат Ю.М., Клепачевская С.Ю., Ланцман П.Ш. Диаграммы структурных состояний и рекристаллизации горячедеформированного сплава АК4-1 // *Физика металлов и металловедение*. 1977. V.44(4). P.834.
- [14] Вайнблат Ю. М. Структурные состояния полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 1992. № 8. С. 34.
- [15] Васильев М. А., Волошко С. М., Яценко Л. Ф. Микроструктура и механические свойства металлов и сплавов, деформированных в жидком азоте // *Успехи физики металлов*. 2012. № 13. С. 303-343.
- [16] Panigrahi S.K., Jayaganthan R., Pancholi V., Gupta M. A DSC study on the precipitation kinetics of cryorolled Al 6063 alloy // *Materials Chemistry and Physics*. 2010. №122. С. 188-193.
- [17] Ramesh Kumar S., Kondaiah Gudimetla, Tejaswi B., Ravisankar B. Effect of Microstructure and Mechanical Properties of Al–Mg Alloy Processed by ECAP at Room Temperature and Cryo Temperature. // *Trans Indian Inst Met*. 2017. V. 70. P. 639-648.
- [18] Niranjani V.L., Kumar K.C.H., Sarma V.S. Development of high strength Al–Mg–Si AA6061 alloy through cold rolling and ageing // *Materials Science and Engineering A*. 2009. V.515. P. 169-174.

REFERENCES

- [1] Patent RF № 2364660, МПК C22F 1/18, B21J 5/100. Sposob polucheniya ul'tramelkozernistykh zagotovok iz titanovykh spлавov / Latysh V.V., Polovnikov V.M., Kandarov V.V. i dr. // *Opubl*. 20.08.09.
- [2] Patent RF №2393936, МПК C22F 1/18, B21J 5/06. Sposob polucheniya ul'tramelkozernistykh zagotovok iz metallov i spлавov / V.A. Shundalov, V.Yu. Ivanov, V.V. Latysh, i dr. // *opubl*. 10.07.10.
- [3] Volokitina I.E., Kurapov G.G. Effect of Initial Structural State on Formation of Structure and Mechanical Properties of Steels Under ECAP // *Metal Science and Heat Treatment*. 2018. V. 59(11-12). P. 786-792.
- [4] Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Valiev R.Z. Struktura, prochnost' i elektroprovodnost' mednogo сплава системы Su–Sr, podvergnutogo intensivnoi plasticheskoj deformatsii // *FMM*. 2015. № 116. S. 219-230.
- [5] Lezhnev S., Nayzabekov A., Volokitin A., Volokitina I. New combined process "pressing-drawing" and impact on properties of deformable aluminum wire // *Procedia Engineering*. 2014. № 81. С.1505 – 1510.
- [6] Litovchenko I.Yu., Akkuzin S.A., Polekhina N.A., Tyumentsev A.N. Vliyanie termomekhanicheskikh obrabotok na formirovanie submikrokristallicheskich strukturykh sostoyanii i mekhanicheskie svoistva metastabil'noi austenitnoi stali // *Pis'ma o materialakh*. 2016. № 4 (24). S. 290–293.
- [7] Lyu Tszyun'vei, Ouyan Tszypen, Lu Shigian i dr. Vliyanie RKUP po marshrutam Vs i S na mikrostrukturu i temperaturu martensitnogo prevrashcheniya сплава NITiNB // *МиТОМ*. 2017. № 1(739). С. 48-53.
- [8] Lezhnev S. N., Volokitina I. E., Volokitin A. V. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of Steel during Pressing–Drawing // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. № 118(11). С. 1167–1170.

[9] Frint P., Wagner M.F.-X., Weber S. et al. An experimental study on optimum lubrication for large-scale severe plastic deformation of aluminum-based alloys // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. V.239. P. 222–229.

[10] Kurapov G.G., Orlova E.P., Volokitina I.E., Turdaliev A. Plasticity as a physical-chemical process of deformation of crystalline solids // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016. V. 51. P. 451-457.

[11] Zhilyaev, A.P. Evolution of microstructure and microtexture in fcc metals during high-pressure torsion / A.P. Zhilyaev, T.R. Mcnelley, T.G. Langdon // *Journal of Materials Science*. – 2007. – V.42, N5. – P.1517-1528.

[12] V.P.Pilyugin L.M. Voronova, M.V. Degtyarev, T.I. Chashchukhina. Osobennosti izmel'cheniya struktury chistogo zheleza pri nizkotemperaturnoi deformatsii pod vysokim davleniem // *Deformatsiya i razrushenie materialov*. – 2011. – N.1. – S.26-30.

[13] Vainblat Yu.M., Klepachevskaya S.Yu., Lantsman P.Sh. Diagrammy strukturnykh sostoyanii i rekristallizatsii goryachedeformirovannogo splava AK4-1 // *Fizika metallov i metallovedenie*. 1977. V.44(4). P.834.

[14] Vainblat Yu. M. Strukturnye sostoyaniya polufabrikatov iz deformiruemykh alyuminievykh splavov // *Tekhnologiya legkikh splavov*. 1992. № 8. S. 34.

[15] Vasil'ev M. A., Voloshko S. M., Yatsenko L. F. Mikrostruktura i mekhanicheskie svoystva metallov i splavov, deformirovannykh v zhidkom azote // *Uspekhi fiziki metallov*. 2012. № 13. S. 303-343.

[16] Panigrahi S.K., Jayaganthan R., Pancholi V., Gupta M. A DSC study on the precipitation kinetics of cryorolled Al 6063 alloy // *Materials Chemistry and Physics*. 2010. №122. C. 188-193.

[17] Ramesh Kumar S., Kondaiah Gudimetla, Tejaswi B., Ravisankar B. Effect of Microstructure and Mechanical Properties of Al–Mg Alloy Processed by ECAP at Room Temperature and Cryo Temperature. // *Trans Indian Inst Met*. 2017. V. 70. P. 639-648.

[18] Niranjani V.L., Kumar K.C.H., Sarma V.S. Development of high strength Al–Mg–Si AA6061 alloy through cold rolling and ageing // *Materials Science and Engineering A*. 2009. V.515. P. 169-174.

¹А.В. Волокитин, ¹А.Б. Найзабеков, ¹И.Е. Волокитина*, ²Е.А. Панин,

³Е.И. Кульдеев, ³Г.Ж. Молдабаева, ⁴Д.В. Куис

¹Рудный индустриальный институт, Рудный, Қазақстан

²Қарағанды мемлекеттік индустриалдық университеті, Теміртау, Қазақстан

³Satbayev University, Алматы, Қазақстан

⁴Беларусь мемлекеттік технологиялық университеті, Беларусь

*e-mail: irinka.vav@mail.ru

ЖОҒАРЫ ҚЫСЫММЕН БҰРАЛУДЫ ЖҮЗЕГЕ АСЫРУҒА АРНАЛҒАН ШТАМП КОНСТРУКЦИЯСЫ

Андатпа. Жоғары берік поршеньдік сақиналарын жасау үшін бастапқы материал болатын сақиналы дайындамаларды деформациялау үшін жоғары қысыммен бұрау арқылы қарқынды пластикалық деформациялау процесін жүзеге асыруға мүмкіндік беретін арнайы штамп конструкциясын жасау жүзеге асырылды. Штамп конструкциясының ерекшелігі - ауыстыру және сондай-ақ айналу блоктарын қамтитын құрамдас деформациялық құралдың арқасында пресс соққының тұрақты тік сызықты қозғалысы кезінде деформациялық аспаптың бұралуын қамтамасыз ету. Алынған геометрияны қолдана отырып, процестің тұрақты ағу мүмкіндігін бағалау үшін Deform бағдарламасында осы процесті компьютерлік модельдеу жүргізілді. Дайындаманың материалы ретінде AISI-316 тот баспайтын болаттан жасалған аустенит класы таңдалды. Алғашқы екі циклде пайда болған деформация күші қарастырылды. Бірінші циклде күш 464 кН, екінші циклде күш мәні шамамен 1200 кН болды. Алынған мәндер жеткілікті, бұл көп циклді деформация мүмкіндігін көрсетеді.

Негізгі сөздер: қарқынды пластикалық деформациясы, жоғары қысыммен бұрау, штамп конструкциясы, модельдеу.

¹A.V. Volokitin, ¹A. B. Naizabekov, ¹I.E. Volokitina*, ²E. A. Panin,
³E.I. Kuldeev, ³G.Zh. Moldabaeva, ⁴D.V. Kuis

¹Rudny industrial Institute, Rudny, Kazakhstan

²Karaganda State Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

³Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

⁴Belarussian State Technological University, Belarussia

*e-mail: irinka.vav@mail.ru

DIE DESIGN FOR HIGH-PRESSURE TORSION

Abstract. A special design of the die was developed, which allows to implement the process of severe plastic deformation by high pressure torsion to deform ring blanks, which will be the starting material for creating high-strength piston rings. A special feature of the die design is the provision of torsion of the deforming tool with constant rectilinear movement of the press punch due to the composite deforming tool, which includes both displacement and rotation blocks. Using the obtained geometry, computer simulation of this process in the Deform program was performed in order to assess the possibility of a stable process flow. AISI-316 austenitic stainless steel was chosen as the material of the billet. The resulting strain force on the first two cycles was considered. On the first cycle, the force was equal to 464 kN, on the second cycle the force value was about 1200 kN. The obtained values are quite adequate, which indicates the possibility of multi-cycle deformation.

Key words: severe plastic deformation, high-pressure torsion, die design, simulation.