

УДК 621.7

В.Л. Калюжний, В.М. Горностай, А.М. Потятиник

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХОЛОДНОГО ПРЯМОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПО СХЕМІ «ЗАГОТОВКА ЗА ЗАГОТОВКОЮ» КРУГЛИХ СТЕРЖНІВ ІЗ СТАЛІ

Методом скінченних елементів проведений розрахунковий аналіз холодного прямого видавлювання по схемі «заготовка за заготовкою» круглих стержнів із сталі. Встановлені ступінь деформації і кут конусу матриці, які забезпечують необхідне пропрацювання структури металу пластичною деформацією для отримання заданої по кресленню деталі величини межі текучості zdeформованого металу по перерізу стержнів. Пропрацювання структури металу оцінювалося по розподілу інтенсивності деформацій. Також визначені залежність зусилля видавлювання від переміщення деформуючого інструмента, розподіли питомих зусиль на інструменті, кінцеві форми та розміри стержнів. По розрахункових даних розроблена та виготовлена конструкція штампів для виконання прямого видавлювання на гідравлічному пресі. Проведені експериментальні дослідження прямого видавлювання відпалених циліндричних заготовок для отримання круглих стержнів. Виконане порівняння даних розрахунків і експериментальних результатів по зусиллях видавлювання, формі стержнів та по величині межі текучості zdeформованого металу по перерізу стержнів. Моделювання методом скінченних елементів дозволяє прогнозувати механічні властивості zdeформованого металу при холодному формоутворенні виробів.

Ключові слова: круглий стержень, холодне пряме видавлювання, метод скінченних елементів, зусилля видавлювання, питоми зусилля, форма і розміри стержнів, інтенсивність деформацій, межа текучості zdeформованого металу.

В.Л. Калюжний, В.Н. Горностай, А.Н. Потятиник

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛОДНОГО ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПО СХЕМЕ "ЗАГОТОВКА ЗА ЗАГОТОВКОЙ" КРУГЛЫХ СТЕРЖНЕЙ ИЗ СТАЛИ

Методом конечных элементов проведен расчетный анализ холодного прямого выдавливания по схеме «заготовка за заготовкой» круглых стержней из стали. Установлены степень деформации и угол конуса матрицы, которые обеспечивают необходимую проработку структуры металла пластической деформацией для получения заданной по чертежу детали величины предела текучести sдеформованного металла по сечению стержней. Проработка структуры металла оценивалась по распределению интенсивности деформаций. Также определены зависимость усилия выдавливания от перемещения деформирующего инструмента, распределения удельных усилий на инструменте, конечные формы и размеры стержней. По расчетным данным разработана и изготовлена конструкция штампа для выполнения прямого выдавливания на гидравлическом прессе. Проведены экспериментальные исследования прямого выдавливания отожженных цилиндрических заготовок для получения круглых стержней. Выполнено сравнение данных расчетов и экспериментальных результатов по усилиям выдавливания, форме стержней и по величине предела текучести sдеформованного металла по сечению стержней. Моделирование методом конечных элементов позволяет прогнозировать механические свойства sдеформованного металла при холодном формообразовании изделий.

Ключевые слова: круглый стержень, холодное прямое выдавливание, метод конечных элементов, усилия выдавливания, удельные усилия, форма и размеры стержней, интенсивность деформаций, предел текучести sдеформованного металла.

V. Kaljuzhny, V. Gornostay, A. Potjatynik

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF COLD FORWARD EXTRUSION ACCORDING TO THE SCHEME "WORKPIECE BEHIND THE WORKPIECE" OF THE ROUND STEEL RODS

Using the finite element method conducted research of cold forward extrusion according to the scheme "workpiece behind the workpiece" of round steel rods. There are determined the degree of deformation and the matrix's angle of the cone, which provide the necessary deformation of the metal structure by plastic deformation to obtain the value of yield stress detail given in the drawing of deformed metal by cross-section of rods. The deformation of the metal structure was evaluated along the distribution of the strain intensity. Also identified the dependence of the extrusion force on the displacement of the deforming tool, distribution of specific forces on the tool, the final shape and sizes of the rods. According to calculated data developed the design of the stamp for forward extrusion on a hydraulic press. There are conducted experimental research of the forward extrusion of annealed cylindrical workpieces for getting round rods. There're performed comparison of calculation data and experimental results on extrusion forces, form of the rods and value of the yield stress of the deformed metal along the cross-section of the rods. Modeling by the finite element method allows to predict the mechanical properties of the deformed metal by the cold forming of products.

Keywords: round rod, cold forward extrusion, finite element method, extrusion force, specific force, shape and sizes of the rods, intensity of deformation, yield strength of the deformed metal.

Существенным преимуществом процессов холодной объемной штамповки (ХОШ) является возможность изготовления высокоточных изделий с необходимой проработкой структуры металла пластической деформацией для обеспечения заданных механических свойств в сформированном металле. Это приводит к повышению надежности и долговечности таких изделий. В работе [1] приведены рекомендации по проектированию технологии холодного прямого выдавливания стержней и штамповой оснастки, которые базируются на производственном опыте и экспериментальных данных. При этом приводится мало сведений по влиянию конструктивных, технологических и физико-механических параметров на механические свойства сформированного металла. В источниках [2-4] приведены экспериментальные данные по упрочнению металла при формообразовании изделий методами гидроэкструзии заготовок из инструментальных сталей, различных сплавов и порошковых заготовок. Однако в настоящее время проведение экспериментальных работ связано со значительными материальными и временными затратами. В работах [5-8] показана возможность прогнозирования механических свойств сформированного металла при холодном прямом выдавливании фасонных стержней на основании данных, которые получены моделированием методом конечных элементов (МКЭ). Расчетный анализ с использованием МКЭ существенно сокращает время на подготовку производства изделий с заданными механическими свойствами методом холодного прямого выдавливания. Актуальной задачей является применения МКЭ для определения параметров холодного прямого выдавливания по схеме «заготовка за заготовкой» круглых стержней конкретных размеров с одновременным обеспечением заданных механических свойств по сечению.

Целью работы является проведение расчетно-экспериментальных исследований по определению влияния конструктивных и технологических параметров при холодном прямом

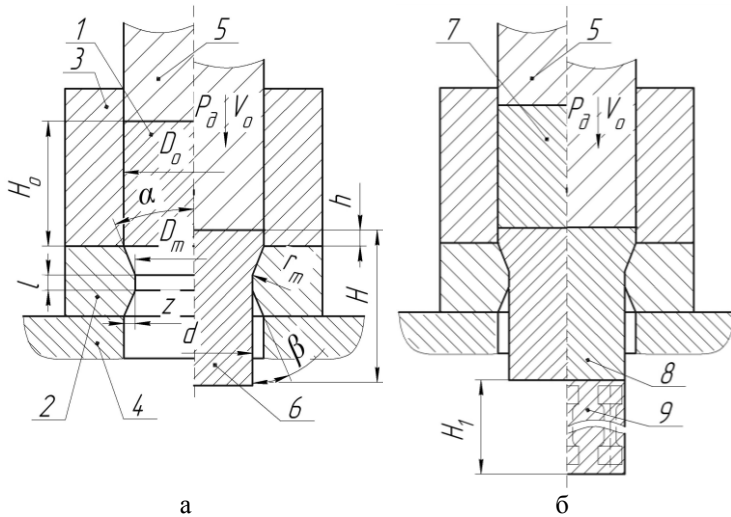


Рис. 1. Прямое выдавливание стержней по схеме «заготовка за заготовкой»

справа – в конце выдавливания. Исходную заготовку 1 устанавливают на конической матрице 2, на которой размещен контейнер 3. Матрицу 2 и контейнер 3 фиксируют на плите 4. Усилия деформирования P_0 прикладывают пуансоном 5, который смещается со скоростью V_0 . За первый ход ползуна пресса получают полуфабрикат 6. Выдавливание второй заготовки приведено на рис. 1б. После подъема пуансона на выдавленный полуфабрикат 6 устанавливают следующую заготовку 7. За второй ход ползуна пресса из этой заготовки получают полуфабрикат 8. При этом из первой заготовки происходит формообразование стержня 9, который выпадает через отверстия в плите 4 и в столе пресса. По такой схеме необходимо получить стержень из стали 45ХНМФА с диаметром $d = 32$ мм, высотой $H_1 = 332$ мм и пределом текучести сформированного металла по сечению стержня не менее $\sigma_s = 700$ МПа. Величину напряжения σ_s определяли путем испытания на растяжение стандартных образцов, которые были вырезаны на оси стержня и около внешней поверхности.

Для проведения расчетных исследований использовали конечно-элементную программу DEFORM. Металл исходных отожженных цилиндрических заготовок считался упругопластическим, а деформирующий инструмент абсолютно жестким. Влияние трения на контактных поверхностях учитывали по Кулону с коэффициентом трения $\mu = 0,08$, что

соответствует смазке фосфатирование с омыливанием. Скорость деформирования составляла $V_o = 2$ мм/сек с учетом проведения экспериментальных работ по выдавливанию на гидравлическом прессе ДБ 2432. Постоянными размерами матрицы были (см. рис. 1а): высота калибрующего пояса $l = 3$ мм, $r_m = 5$ мм, $D_m = 32$ мм, $\beta = 30^\circ$, $z = 0,2$ мм. Размеры исходной заготовки D_o и H_o , угол матрицы α устанавливали моделированием для обеспечения необходимой проработки структуры металла пластической деформацией, которую оценивали по распределению интенсивности деформаций ε_i в стержне после выдавливания. По экспериментальной диаграмме истинных напряжений и расчетным значениям ε_i можно установить величину напряжения текучести сформированного металла σ_s по сечению стержня после выдавливания.

Результаты расчетных исследований приведены для установленных размеров исходной заготовки $D_o = 38$ мм и $H_o = 250$ мм и угла матрицы $\alpha = 16^\circ$, которые обеспечили необходимую проработку структуры металла пластической деформации по сечению стержня и заданную величину предела текучести сформированного металла по сечению стержня. Расчетные схемы в разрезе в начале и в конце выдавливания первой и второй заготовок приведены на рис. 2. На рис. 2а показана схема в начале выдавливания первой заготовки. Исходная заготовка 1 размещена в контейнере 2 на матрице 3. Усилие деформирования прикладывают с помощью пуансона 4. В результате выдавливания первой заготовки получают полуфабрикат 5 (рис. 2б). Вторую заготовку 6 устанавливают на полуфабрикат 5 (рис. 2в). После выдавливания второй заготовки получают стержень 7 и полуфабрикат 8 (рис. 2г).

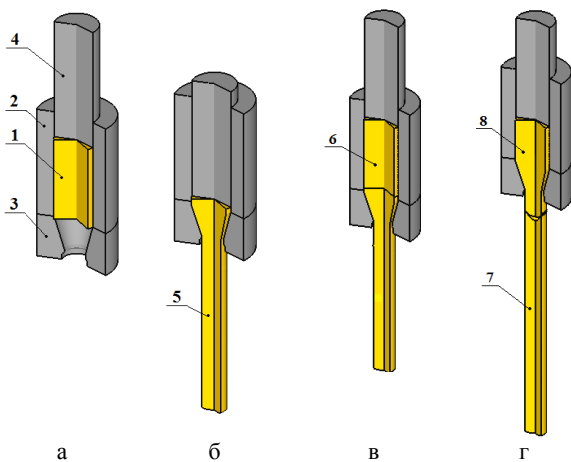


Рис. 2. Расчетные схемы в разрезе в начале и в конце выдавливания первой и второй заготовок



Рис. 3. Зависимости усилия выдавливания первой и второй заготовок от перемещения пуансона

На рис. 3 показаны зависимости усилия выдавливания от перемещения пуансона при выдавливании первой и второй заготовок. Максимальное усилие выдавливания первой заготовки получено при перемещении пуансона на 22 мм и составляет 900 кН, после чего усилие снижается и в конце выдавливания составляет 720 кН. При выдавливании второй заготовки усилие достигает 1100 кН, что связано с воздействием в конусе матрицы оставшейся части первой заготовки. Для проектирования штамповой оснастки необходимо иметь величины удельных усилий на деформирующем инструменте. Величины удельных усилий определяли по распределению нормальных напряжений на поверхностях заготовки, которые контактируют с инструментом. На рис. 4 наведены распределения нормальных напряжений на деформирующем инструменте при максимальном значении усилия выдавливания второй заготовки. На рис. 4а показано распределение таких напряжений по радиусу пуансона. С увеличением радиуса возрастают нормальные напряжения. Распределение нормальных напряжений по высоте контейнера приведены на рис. 4б. На контейнере наибольшее значение напряжений 612 МПа получено в месте контакта контейнера с верхним торцом заготовки, а значение 578 МПа имеет место в нижней части контейнера. При таких удельных усилиях контейнер необходимо выполнять однобандажированным. На матрице максимальное нормальное напряжение 2100 МПа возникает в

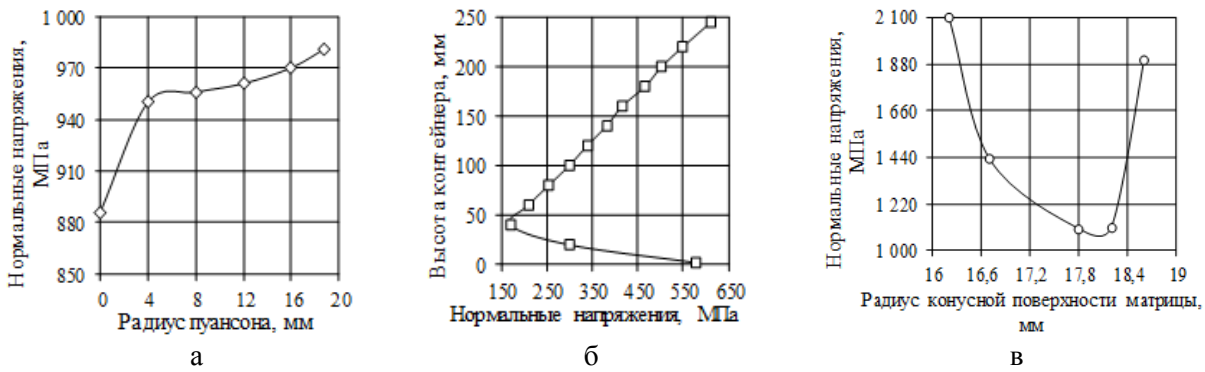


Рис. 4. Распределения нормальных напряжений на деформирующем инструменте

месте перехода конусной части в калибрующий пояс с дальнейшим уменьшением до 1100 МПа на радиусе конусной поверхности 18 мм, а потом идет увеличение до 1900 МПа на радиусе 18,7 мм (рис. 4в). При таких значениях удельных усилий необходимо применение двухбандажированной матрицы.

Моделированием установлено, что разъединение заготовок при выдавливании происходит во время формообразования второй заготовки в конусе матрицы. Начало разъединения между заготовками и распределение интенсивности деформаций ϵ_i в продольном сечении стержня приведены на рис. 5. Начало разъединения и образование утяжины на верхнем торце первой заготовки изображено на рис. 5а. На рис. 5б приведено распределение интенсивности деформаций ϵ_i . Проработка металла пластической деформацией происходит неравномерно по поперечному сечению стержня. В слоях металла на оси симметрии получена величина $\epsilon_i=0,38$. Слои металла на наружной поверхности стержня деформируются интенсивнее, что приводит к достижению величины интенсивности деформаций $\epsilon_i=0,63$. По экспериментальной диаграмме истинных напряжений для рассматриваемой стали при величине интенсивности деформаций больше 0,25 предел текучести имеет величину не менее 700 МПа, что соответствует требованиям по чертежу детали.

Для проведения экспериментальных работ по расчетным данным была спроектирована и изготовлена конструкция штампа для прямого выдавливания по схеме "заготовка за заготовкой". Конструкция штампа изображена на рис. 6. Двухбандажированная матрица 1 и

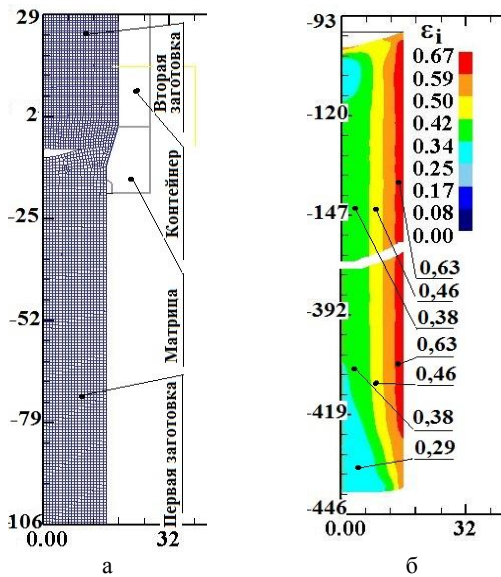


Рис. 5. Начало разъединения заготовок и распределение интенсивности деформаций ϵ_i в продольном сечении стержня. Размеры по осям в миллиметрах

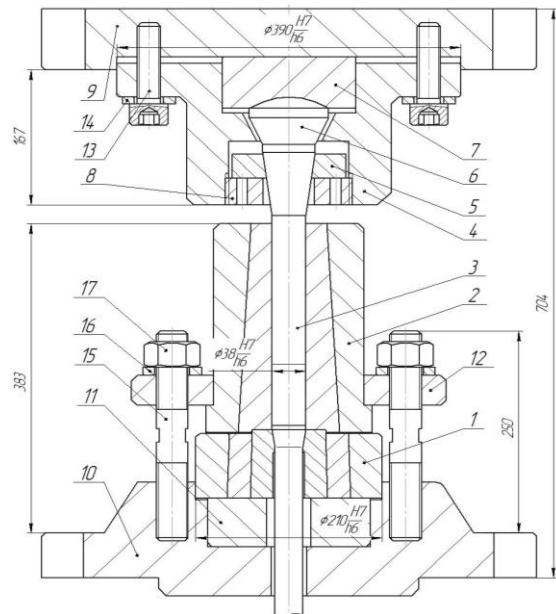


Рис. 6. Конструкция штампа для прямого выдавливания по схеме «заготовка за заготовкой»

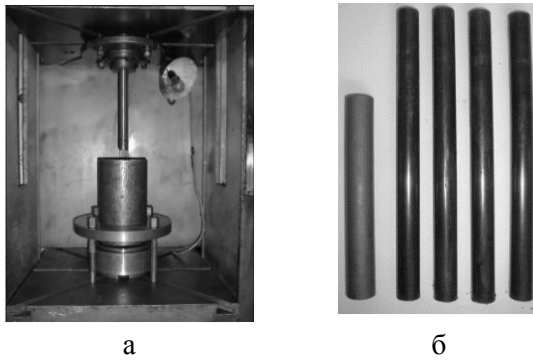


Рис. 7. Фотографії штампа на пресі, вихідна заготовка і отримані стержні

однобандажированный контейнер 2 установленны на опоре 11 и закреплены к нижней плите 10 с помощью кольца 12, шпилек 15, шайб 16 и гаек 17. К верхней плите 9 винтами 13 с шайбами 14 закреплен пуансонодержатель 4 с пятой 6 и подпятником 7. В пуансонодержателе 4 также размещены конусное кольцо 5 с пуансоном 3 и зафиксированы гайкой 8. В контейнер 2 устанавливают первую исходную заготовку. При ходе ползуна вниз деформируют первую заготовку с прессостатком высотой 5 мм. После этого в контейнер 2 размещают вторую заготовку, которая после выдавливания выжимает первую заготовку из матрицы. Штамп

устанавливали на гидравлическом пресе ДБ 2432 усилием 1,6 МН. На отожжённые заготовки из стали 45ХНМФА наносили смазку фосфатирование с омыливанием. Фотографии штампа на пресе, исходной заготовки и полученных стержней показаны на рис. 7. На рис. 7а приведена фотография штампа на пресе. Исходная заготовка с нанесенной смазкой и полученные стержни наведены на рис. 7б. Экспериментальные величины максимальных усилий выдавливания первой и второй заготовок определяли по показаниям манометра преса, которые соответственно составили 930 и 1120 кН. Максимальное значение расхождения с расчетными данными (см. рис. 3) получено 4%.

У первой и второй сформированных заготовках проведены замеры в сечении размеров торцов. На рис. 8 показаны расчетные формы и размеры первой и второй сформированных заготовок, а также точками отмечены результаты измерений. Экспериментальные результаты практически совпали с данными моделирования. На верхнем торце первой заготовки образуется утяжина глубиной 4 мм, на нижнем торце получен выступ высотой 1,2 мм. На нижнем торце второй заготовки имеет место выступ высотой 3 мм.

При холодном выдавливании повышается температура сформированного металла. На рис. 9 приведено распределение температуры в сформированного металла в первой и второй заготовках. В стержне первой заготовки температура достигает 85°C (рис. 9а). Экспериментальное значение температуры по пирометру составило 82°C. У второй заготовки максимальная температура сформированного металла по результатам моделирования достигает 91°C (рис. 9б). Величина по показаниям пирометра составила 89°C. Установленные значения температуры позволяют уточнить требования к смазкам для холодного выдавливания.

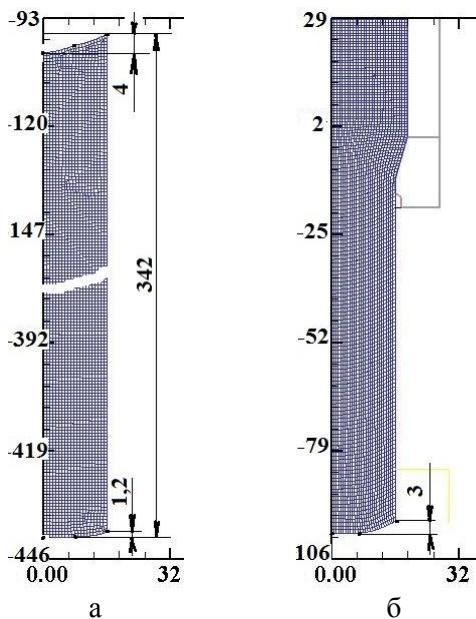


Рис. 8. Форма и размеры первой и второй сформированных заготовок

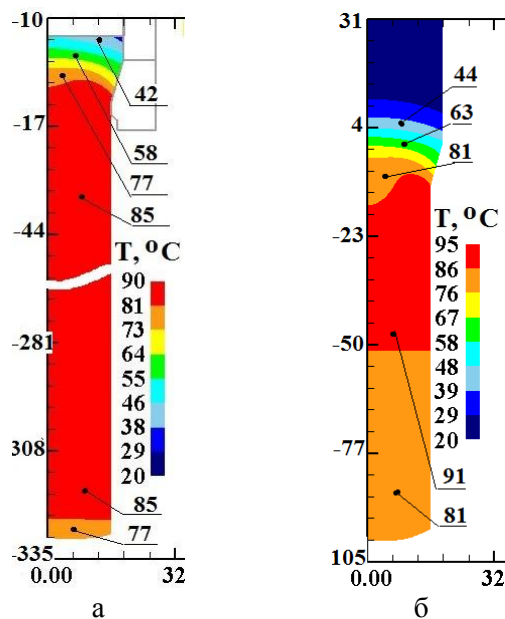


Рис. 9. Температура сформированного металла первой и второй заготовок

Для определения предела текучести σ_s сформированного металла в продольном сечении полученных стержней были вырезаны для испытания на растяжение стандартные образцы на оси стержня и вблизи внешней поверхности. На оси стержня получена величина $\sigma_s = 720$ МПа, вблизи внешней поверхности - $\sigma_s = 950$ МПа.

Выводы. Методом конечных элементов проведен анализ холодного выдавливания круглых стержней по схеме «заготовка за заготовкой». Установлены степень деформации и угол конуса матрицы, которые обеспечили необходимую проработку структуры металла пластической деформацией и достижение заданного по чертежу детали предела текучести сформированного металла по сечению стержня. Моделированием выявлены зависимости усилия выдавливания от перемещения деформирующего инструмента, распределение удельных усилий на контактирующих поверхностях, температура сформированного металла, конечные формы и размеры стержней после выдавливания. По расчетным данным спроектирована и изготовлена штамповая оснастка для проведения экспериментальных исследований холодного прямого выдавливания. Проведены экспериментальные работы по холодному выдавливанию стержней по схеме «заготовка за заготовкой». Результаты экспериментов подтвердили расчетные данные по усилию выдавливания, форме и размерам полученных стержней, а также по пределу текучести сформированного металла по сечению стержней.

Список использованных источников:

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т.; т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. - 384 с.
2. Черный Ю.Ф. Гидропрессование инструментальных сталей / Ю.Ф. Черный, В.З. Спусканюк, А.А. Лядская и др. – К: Техника, 1987. – 216 с.
3. Волков К.В. Упрочнение материалов методами гидропрессования / К.В. Волков, А.И. Капустин, В.З. Спусканюк и др. – К.: Наукова думка, 1991. – 200 с.
4. Белошенко В.А. Теория и практика гидроэкструзии / В.А. Белошенко, В.Н. Варюхин, В.З. Спусканюк. – К: Наукова думка, 2007, - 246 с.
5. Калюжный В.Л. Визначення зусилля прямого холодного видавлювання з роздачею прямокутних профілів / В.Л. Калюжный, О.В. Калюжный В.М. Горностай // Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2009. - №1 (20). - С. 23-27.
6. Калюжный В.Л. Створення високопродуктивних, ресурсозберігаючих технологій виготовлення холодним об'ємним штампуванням високоточних виробів з пластичних і малопластичних металів / В. Л. Калюжный // Вестник Машиностроение. - К: НТУУ «КПИ», 2010. - №60. – С. 19-25.
7. Калюжный В.Л. Прямое холодное выдавливание с раздачей профилей из сталей / В.Л. Калюжный, В.Н. Горностай, А.С. Запороженко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. – Х: НТУ «ХПИ», 2012. – № 47 (953). – С. 110–115.
8. Кузьменко В.И. Влияние контактного трения на характер течения и силовой режим процесса прямого выдавливания с уширением / В.И. Кузьменко, В.Н. Горностай, В.О. Василенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. – Х: НТУ «ХПИ», 2013. – № 42 (1015). – С. 110–114.

Рецензенты:

Гожий Сергей Петрович, д.т.н., профессор кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов, КПИ им. Игоря Сикорского.

Баглюк Геннадий Анатолиевич, д.т.н., с.н.с., заместитель директора по научной работе ИПМ НАН Украины.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2017