

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №6 (156). С.21-28.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №6 (156). P. 21-28.

Научная статья
УДК 621.983.3.539.376
doi: 10.30987/2223-4608-2024-21-28

Горячее деформирование корпусных заготовок в изотермических условиях

Сергей Николаевич Ларин¹, д.т.н.

Юлия Вячеславовна Бессмертная², к.т.н.

^{1,2} Тульский государственный университет, Тула, Россия

¹ mpf-tula@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9063-1578>

² bessmertny@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Основное производство пустотелых изделий, имеющих периодически меняющийся внутренний профиль, заключается в мех/обработке поковок. Однако при этом велики потери металла в отход, а также несмотря на высокое качество получаемых изделий, их механические характеристики не всегда соответствуют требованиям функционирования. В узлах техники, подверженной тяжелым нагрузкам данные детали принято изготавливать из высокопрочных материалов. Ввиду сложности обработки заготовок из высокопрочных сплавов операции проводят с подогревом подвергаемой деформации зоны полуфабриката или с его полным нагревом. Перспективным является применение медленного деформирования в горячем состоянии при определенных скоростных условиях. Рассмотрен процесс формирования внутреннего рельефа на пустотелых оболочках из титанового сплава VT6. Данные изделия в основном используются в качестве всевозможных корпусов для нужд летательной техники и изготавливаются специальными методами машиностроения. Ввиду применения высокопрочных материалов заготовок имеются сложности с реализацией технологий. В статье выполнена оценка силовых режимов формообразования рельефа на оболочках на основе проведенного САЕ моделирования. Моделирование выполнялось в комплексе *deform*. Акцент в исследованиях был сделан на оценке сил деформирования и интенсивностей напряжений. Выявлено влияние степеней деформации, скоростей деформирования, геометрии пуансона на силу процесса и интенсивности напряжений. Получено уравнение регрессии для оценки сил процесса. Получены рекомендации по проектированию технологий формообразования утолщений. Установлены режимы деформирования, позволяющие добиться рациональных силовых режимов, соответственно нагрузок на инструмент, что косвенно влияет на его стойкость, а также на напряженное состояние в изделии.

Ключевые слова: выдавливание; анализ, корпусные заготовки, моделирование

Благодарности: работа выполнена в рамках гранта РФФИ 23-29-00470.

Для цитирования: Ларин С.Н., Бессмертная Ю.В. Горячее деформирование корпусных заготовок в изотермических условиях // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 21–28 doi: 10.30987/2223-4608-2024-21-28

Hot forming of box-shaped material blanks under isothermal conditions

Sergey N. Larin¹, D. Eng.

Yulia V. Bessmertnaya², Ph.D. Eng.

^{1,2} Tula State University, Tula, Russia

¹ mpf-tula@rambler.ru

² bessmertny@rambler.ru

Abstract. Core operations with hollow products, having a periodically changing internal profile, consists in the final machining of press forgings. However, at the same time, metal rejects are high, and despite the high quality of the products obtained, their mechanical characteristics do not always meet the requirements of functioning. For the equipment units, when subjected to heavy loads, the parts are usually made of high-strength materials. Due to the complexity of the work on a workpieces made of high-strength alloys, operations are carried out with heating of the deformed zone of the in-process part or with a total heating. The use of slow deformation in the hot state under certain speed conditions is promising. The process of the internal pattern formation for hollow shells made of titanium alloy VT6 is viewed. These products are mainly used as various airframes and are made using special methods of mechanical engineering. Due to the use of high-strength billet materials, there are difficulties with the mechanization of the production methods. The article evaluates force conditions for generation of geometry on the shells based on CAE modeling. The simulation was performed in the *deform* complex. The focus of the research was on the assessment of deformation forces and stress intensities. The influence of deformation ratio, strain rates, punch geometry on the strength of the process and stress intensity has been revealed. A regression equation to estimate the forces of the process is deduced. Recommendations on

the design of fillets forming operations have been obtained. Deformation modes aimed at achieving rational power modes, respectively, loads on the tool, which indirectly affects its durability, as well as the stress condition in the product, have been found.

Keywords: extrusion molding; analysis (study), airframes, modeling

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the RHNH grant 23-29-00470.

For citation: Larin S.N., Bessmertnaya Yu.V. Hot forming of box-shaped material blanks under isothermal conditions / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 6 (156). P. 21–28. doi: 10.30987/2223-4608-2024-21-28

Элементы узлов изделий с усилением жесткости на внутренних поверхностях при формообразовании связаны с процессами деформирования пустотелых полуфабрикатов или трубных заготовок [1 – 3]. В узлах техники, подверженной тяжелым нагрузкам данные детали принято изготавливать из высокопрочных материалов. Ввиду сложности обработки заготовок из высокопрочных сплавов операции проводят с подогревом подвергаемой деформации зоны полуфабриката или с его полным нагревом [4 – 7]. Кроме того, с нагревом заготовки возможно формирование больших силовых нагрузок на инструмент и разрушение материала заготовки. Ввиду этого необходимо поддерживать температурный режим и обеспечивать небольшие скорости деформирования. Как правило, формирование ступенчатого внутреннего рельефа на корпусах реализуют с общим нагревом непосредственно в рабочем пространстве штампа. Эскиз типовых деталей дан на рис. 1.

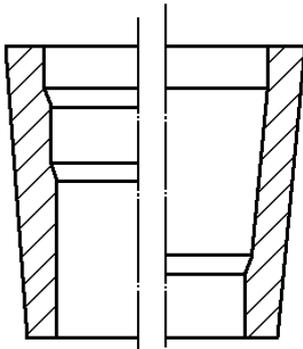


Рис. 1. Типовой эскиз внутренней поверхности деталей, формируемой при деформировании

Fig. 1. A typical sketch of the inner surface of the parts under deformation

Основное производство пустотелых изделий, имеющих периодически меняющийся внутренний профиль, заключается в мехобработке поковок. Однако при этом велики потери

металла в отход, а также несмотря на высокое качество получаемых изделий, их механические характеристики не всегда соответствуют требованиям функционирования. Перспективным является применение медленного деформирования в горячем состоянии при сложных скоростных условиях, которое позволяет значительно увеличить пластичность деформируемого металла, что позволяет достичь значительных степеней деформации и сократить затрачиваемую на операцию энергию.

Мало внимания уделяется в научно-технической литературе исследованиям напряженного и деформированного состояниям заготовки, силовых режимов и предельных возможностей формообразования при деформировании корпусных заготовок в целях формирования внутреннего рельефа [8 – 11].

Выполнено моделирование операции, эскиз которой представлен на рис. 2. Набор внутренних ступенчатых утолщений на конической части заготовки производится на полуфабрикатах сплава ВТ6 при постоянной температуре 850 °С. Формирование внутреннего рельефа реализуется за счет внедрения во внутреннюю поверхность полуфабриката рабочего инструмента. Ввиду постепенного внедрения пуансона стенка полуфабриката подвергается утонению в зоне деформирующих ребер на пуансоне. При этом материал полуфабриката вытекает в полости пуансона. Таким образом реализуется набор утолщений. На рис. 2 представлен эскиз полуфабриката под операцию. Также на рисунке представлен эскиз рабочего инструмента. В процессе моделирования варьировалась скорость деформирования 5...40 мм/мин; коэффициент кантатного трения 0,3...0,7; наружный радиус полости пуансона $r_n = 117...121$ мм и высота формируемого утолщения $h = 20...45$ мм. Угол конусности $\alpha = 5^\circ$. Условием выполнения операции считалось полное заполнение выступа в пуансоне под формируемое утолщение.

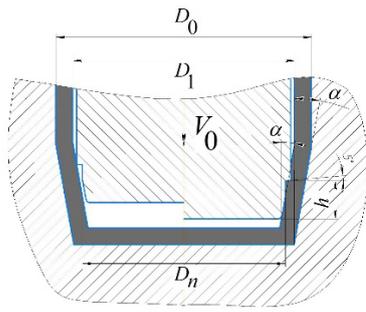


Рис. 2. Схема операции

Fig. 2. Operation diagram

Моделирование выполнялось в комплексе deform. Акцент в исследованиях был сделан на оценке сил деформирования и интенсивностей напряжений. Для чего во внутренних слоях заготовки, близких к пуансону были выбраны точки для контроля напряжений. Эскиз с оценкой размещения контрольных точек перед формообразованием и в конечной стадии процесса представлен на рис. 3.

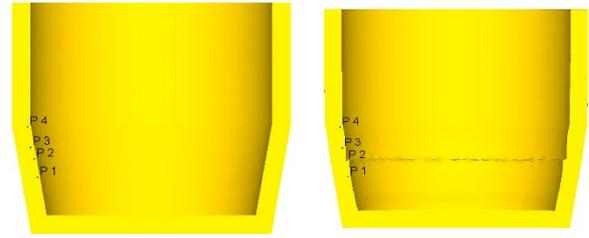


Рис. 3. Эскиз с оценкой размещения контрольных точек

Fig. 3. Sketch of estimation of control points nesting

Для выбранных точек была произведена оценка изменения интенсивности напряжений от относительной величины хода формообразующего пуансона. На рис. 4 даны графики изменения интенсивности напряжений для относительного диаметра впадины в пуансоне $\bar{r} = D_n / D_1 = 0,93$.

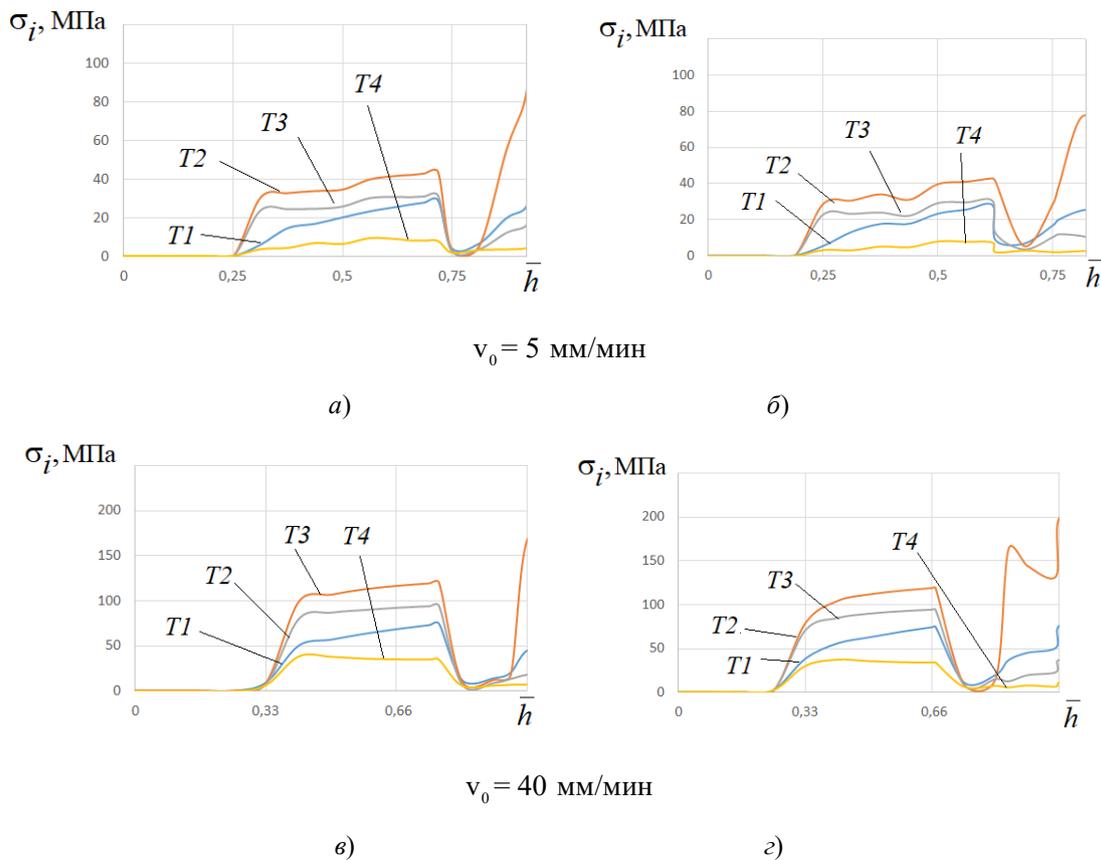


Рис. 4. Изменение интенсивности напряжений для рассматриваемых точек ($D_n/D_1 = 0,93$):
а, в – $h = 20$ мм; б, г – $h = 45$ мм

Fig. 4. Change in stress intensity for the points under consideration ($D_n / D_1 = 0,93$):
а, в – $h = 20$ mm; б, г – $h = 45$ mm

Выявлено, что рост скоростей движения формообразующего пуансона приводит к росту величины интенсивности напряжений в 2...2,5 раза. Увеличение высоты формообразуемого внутреннего выступа в основном не ведет к увеличению интенсивности напряжений в детали.

Аналогичные зависимости изменения интенсивностей напряжений для относительного диаметра впадины в пуансоне $\bar{r} = D_n / D_1 = 0,97$ представлены на рис. 5.

Анализ приведенных ниже графиков позволяет сказать о том, что изменение ширины

формообразуемого утолщения и его высоты не приводит к заметному изменению напряжений в рассматриваемых точках и соответственно в материале изделия в целом. Наибольшее влияние на интенсивности напряжений в рассматриваемом температурном интервале оказывает изменение скорости деформирования. Для меньшей ширины формообразуемого утолщения увеличение скорости деформирования приводит к росту интенсивностей напряжений в 2,5...3 раза. Таким образом обеспечение скоростей деформирования в интервале 5...20 мм/мин обеспечивает наименьшие значения интенсивностей напряжений.

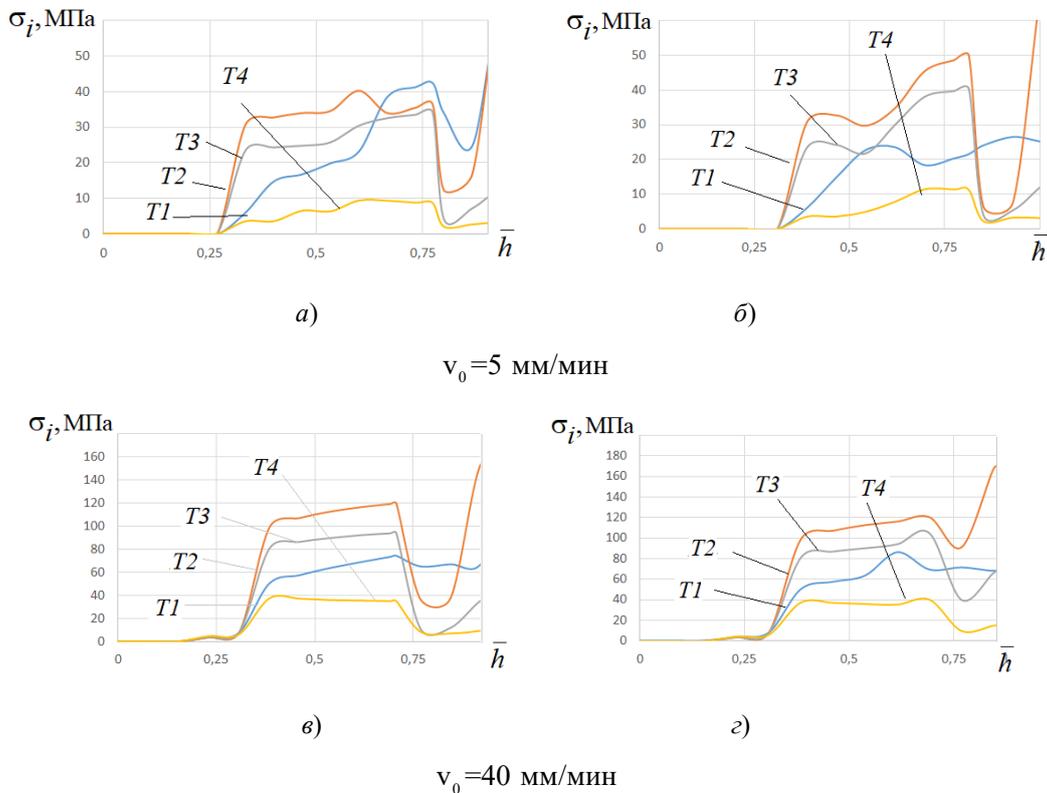


Рис. 5. Изменение интенсивности напряжений для рассматриваемых точек ($D_n/D_1 = 0,97$):
а, в – $h = 20$ мм; б, г – $h = 45$ мм

Fig. 5. Change in stress intensity for the points under consideration ($D_n/D_1 = 0,97$):
а, с – $h = 20$ mm; б, д – $h = 45$ mm

Исходя из анализа рис. 4 и 5 наиболее нагруженными являются зоны заготовки в области точек 2 и 4. Для меньшей ширины формообразуемого утолщения значения интенсивностей напряжений в интервале $\bar{h} = 0...0,75$ близки. Сам график изменения интенсивностей напряжений носит сложный характер, что связано с особенностями течения материала заготовки. Максимальной величины интенсивности напряжений для точек 2 и 3 имеют в конце хода. Для точек 1 и 4 в интервале $\bar{h} = 0...0,75$.

Выполнена оценка сил формообразования утолщения на внутренней поверхности заготовки в зависимости от степеней деформации и скоростей деформирования. На рис. 6 представлены графики изменения силы на пуансоне P в зависимости от относительного диаметра впадины в пуансоне $\bar{r} = D_n / D_1$ для высот формируемого утолщения $h = 20$ и 45 мм.

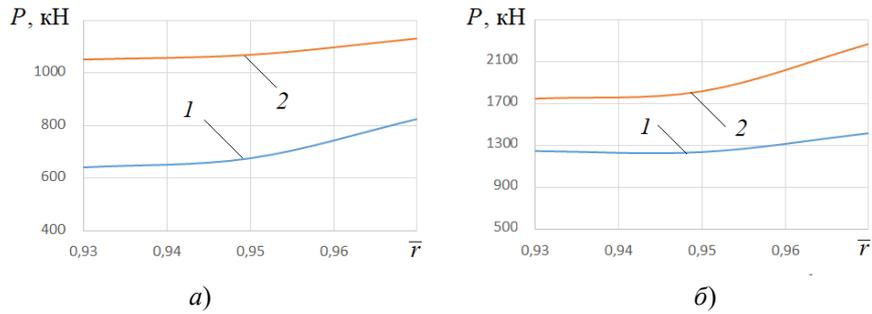


Рис. 6. Изменение силы деформирования от ширины формируемого утолщения:
 $a - v_0 = 5 \text{ мм/мин}$; $b - v_0 = 5 \text{ мм/мин}$; $1 - h = 20 \text{ мм}$; $2 - h = 45 \text{ мм}$

Fig. 6. Change in the deformation force depending on the width of bulgings:
 $a - v_0 = 5 \text{ mm/min}$; $b - v_0 = 5 \text{ mm/min}$; $1 - h = 20 \text{ mm}$; $2 - h = 45 \text{ mm}$

Графики (рис. 6) построены по максимальным величинам сил, возникающих в процессе формообразования. На рис. 7 даны графики изменения силы от относительной величины хода инструмента для разных величин степеней деформации и скоростей деформирования.

Установлено, что увеличение ширины формообразуемого утолщения приводит к снижению

силы деформирования на 10...20 %, что связано с частичной разгрузкой пуансона ввиду истечения металла в полость под утолщение. Увеличение высоты формируемого участка приводит к росту силы на 30 %. Рост скоростей деформирования ведет к увеличению сил штамповки на 35...50 %.

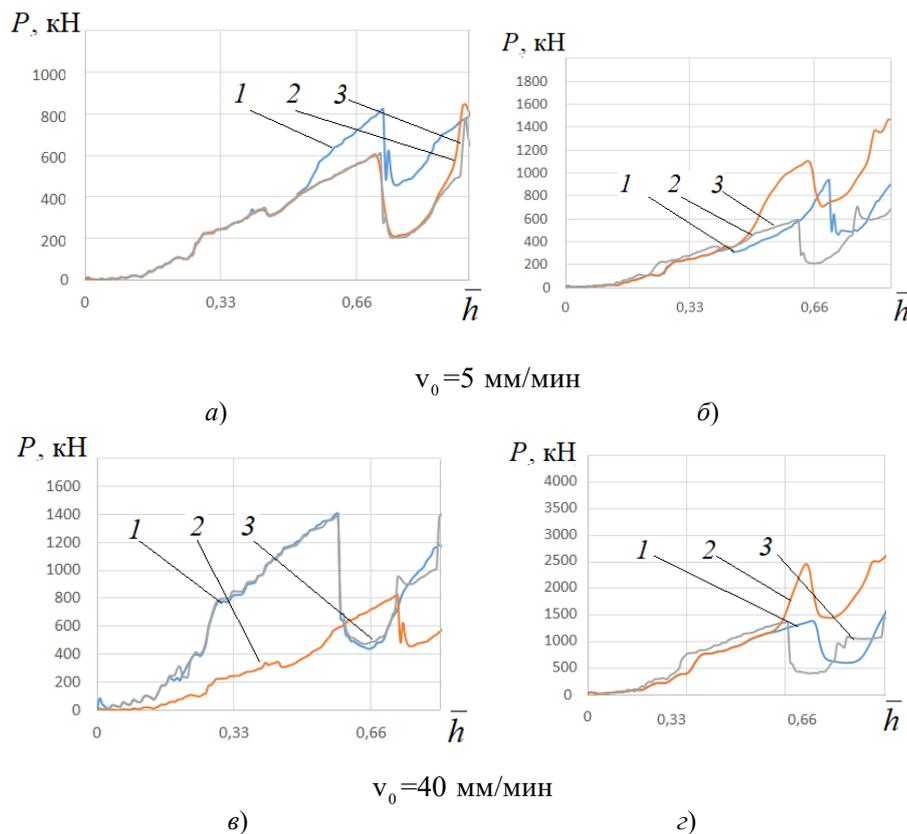


Рис. 7. Изменение силы в процессе формообразования:

$a, c - h = 20 \text{ мм}$; $b, d - h = 45 \text{ мм}$; $1 - D_n / D_1 = 0,95$; $2 - D_n / D_1 = 0,97$; $3 - D_n / D_1 = 0,93$;

Fig. 7. Force change under generation of geometry:

$a, c - h = 20 \text{ mm}$; $b, d - h = 45 \text{ mm}$; $1 - D_n / D_1 = 0,95$; $2 - D_n / D_1 = 0,97$; $3 - D_n / D_1 = 0,93$;

Полученные графики носят сложный характер. На рис. 8 представлены схемы иллюстрирующие степень заполнения полости в пуансоне на разных этапах деформирования. Данные зависимости можно условно поделить на три участка. Исходя из анализа графика видно, что на первом этапе наблюдается рост сил формообразования до момента начала

заполнения полости. Затем на втором этапе наблюдается снижение сил, что связано с активным истечением металла в полость, формируемую пуансоном. Происходит снижение нагрузки на поверхность пуансона. Затем на третьем этапе наблюдается резкий рост сил, что связано с заполнением полости и ростом гидростатического давления.

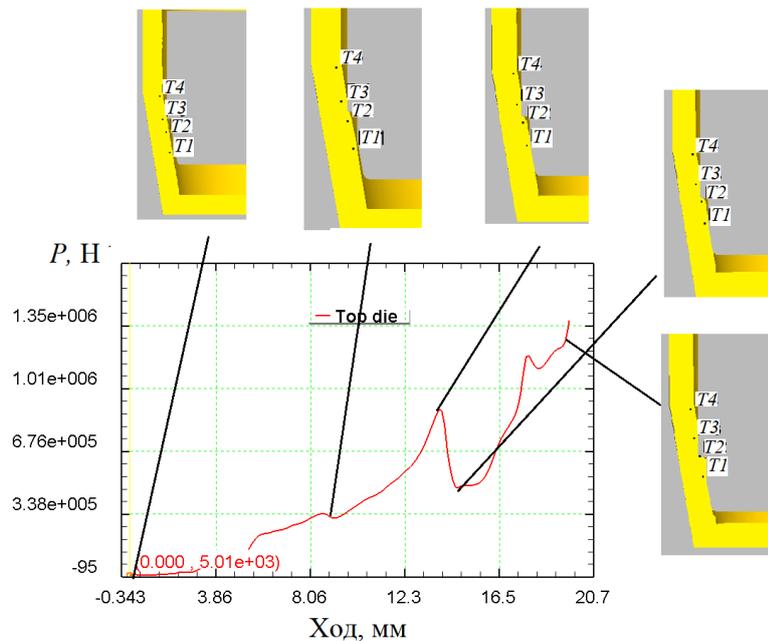


Рис. 8. Изменение силы в процессе формообразования:

$D_n / D_1 = 0,95$; $v_0 = 5$ мм/мин; $h = 45$ мм

Fig. 8. Force change under generation of geometry:

$D_n / D_1 = 0,95$; $v_0 = 5$ mm/min; $h = 45$ mm

Был проанализирован процесс формообразования изделия с внутренним рельефом посредством выдавливания из прутка за один переход. На рис. 9 представлены графики изменения силовых нагрузок для выдавливания детали из прутка при степени деформации $D_n / D_1 = 0,95$ и высоте выступа $h = 45$ мм. Данный график условно делится на процесс выдавливания и формирование утолщения на внутренней поверхности детали.

Сравнив результаты для выдавливания из прутковой заготовки с результатами, полученными в ходе моделирования при формировании рельефа на пустотелом полуфабрикате, можно сказать, что давление, оказываемое на рабочую часть пуансона (формирующую

утолщения на заготовке) при выдавливании прутка больше в 2,5 раза больше, чем при выдавливании ребер на полуфабрикате.

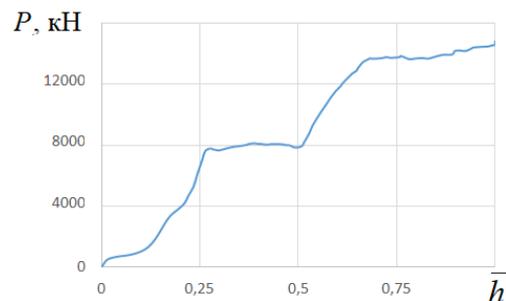


Рис. 9. Изменение силы в процессе выдавливания

Fig. 9. Force change under extrusion

Пользуясь результатами выполненных исследований, было выполнено статистическое моделирование рассматриваемой операции. Установлено, что на силу наибольшее влияние оказывают следующие факторы: скорость перемещения пуансона v_0 , мм/мин,

высота формообразуемого участка h , коэффициент трения μ .

Сформирована таблица факторного пространства для оценки сил (табл. 1) [12]. В табл. 2 дана матрица планирования [12].

1. Факторное пространство оценки силы

1. The factorial space of force estimation

Факторы				Уровни варьирования факторов		
№	Наименование фактора	Натуральное значение фактора	Кодированное обозначение фактора	$X_{i \min}$	X_{i0}	$X_{i \max}$
1	Скорость перемещения пуансона	v	X_1	5,0	22,5	40
2	Высота формообразуемого участка	h	X_2	20	32,5	45
3	Коэффициент трения	μ	X_3	0,3	0,55	0,8

2. Матрица планирования эксперимента

2. Experiment planning matrix

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	
1	+	-	-	-	660
2	+	+	-	-	1270
3	+	-	+	-	1100
4	+	+	+	-	1760
5	+	-	-	+	759
6	+	+	-	+	1447
7	+	-	+	+	1276
8	+	+	+	+	2024

Однородность оценивается с помощью критерия Кохрана (0,277). Проверка адекватности полученных моделей выполнялось с помощью критерия Фишера (0,24). По результатам статистического моделирования было получено уравнение регрессии в кодированных и натуральных значениях факторов соответственно:

$$y = 1287 + 338,25X_1 + 253X_2 + X_3 89,5;$$

$$P = 678,15 + 19,32v_0 + 20,42h + 358\mu.$$

Таким образом установлены режимы деформирования, позволяющие добиться рациональных силовых режимов, соответственно нагрузок на инструмент, что косвенно влияет на его стойкость, а также на напряженное состояние в изделии. Получено уравнение регрессии, позволяющее определить силу деформирования. В частности, наилучшими скоростными режимами является интервал скорости 5...20 мм/мин при температуре 850 °С.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ковка** и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка / Под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.
2. **Малинин Н.Н.** Ползучесть в обработке металлов: учебное пособие для вузов. М.: Юрайт, 2022. 221 с.
3. **Яковлев С.П., Чудин В.Н. и др.** Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 2003. 427 с.
4. **Гун Г.Я.** Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Metallurgia. 1980. 456 с.
5. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением М.: Metallurgia, 1986. 688 с.
6. **Теория** обработки металлов давлением / под ред. Голенкова В.А., Яковлева С.П. и др. / М. Машиностроение. 2009. 442 с.
7. **Ларин С.Н., Чудин В.Н., Пасынков А.А.** Высадка краевого утолщения на корпусах при нестационарном вязкопластическом деформировании // Цветные металлы. 2020. 7. С. 88–78.
8. **Черняев А.В., Чудин В.Н., Гладков В.А.** Изотермическое выдавливание утолщений и фланцев на осесимметричных заготовках // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. №4. С. 164–167.
9. **Чудин В.Н.** Горячее выдавливание внутренних ступеней на корпусах // Научное издание в машиностроении. 2018. №1. С. 10–13.
10. **Романов К.И.** Механика горячего формоизменения металлов. М.: Машиностроение, 1993, 240 с.
11. **Пасынков А.А., Ларин С.Н., Исаева А.Н.** Теоретическое обоснование схемы обратного изотермического выдавливания трубной заготовки с активным трением и вытяжкой ее краевой части // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. №10. С. 462–465.
12. **Панфилов Г.В., Недошвин С.В., Лазарев А.А.** Активный статистический анализ систем с теоретическими моделями проведением машинного эксперимента // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2014. Вып. 5. С. 98–112.

REFERENCES

1. Forging and stamping: Reference book: in 4 vol. vol. 2. Hot stamping / Edited by E.I. Semenov. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 720 p.
2. Malinin N.N. Creep in metalworking: a textbook for universities. Moscow: Yurait, 2022, 221 p.
3. Yakovlev S.P., Chudin V.N. et. al. Isothermal deformation of high-strength anisotropic materials. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 427 p.
4. Gun G.Ya. Theoretical foundations of metalworking by pressure. Moscow: Metallurgia. 1980, 456 p.
5. Kolmogorov V.L. Mechanics of pressure metal treatment. Moscow: Metallurgia, 1986, 688 p.
6. Theory of pressure metal treatment / ed. by Golenkova V.A., Yakovleva S.P. et.al. / Moscow: Mashinostroenie. 2009, 442 p.
7. Larin S.N., Chudin V.N., Pasyнков A.A. Upsetting of edge thickening on housings under non-stationary viscoplastic deformation // Non-ferrous metals. 2020, v.7, pp. 88–78.
8. Chernyaev A.V., Chudin V.N., Gladkov V.A. Isothermal extrusion of thicknesses and flanges on axisymmetrical workpieces // Zagotovitelnyy proizvodstva v mashinostroyeni, 2021, no. 4, pp. 164–167.
9. Chudin V.N. Hot extrusion of inner stages in housings // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2018, no.1, pp. 10–13.
10. Romanov K.I. Mechanics of hot forming of metals Moscow: Mashinostroenie, 1993, 240 p.
11. Pasyнков A.A., Larin S.N., Isaeva A.N. Theoretical substantiation of reverse isothermal extrusion scheme of pipe billet with active friction and drawing of its edge part // Zagotovitelnyy proizvodstva v mashinostroyeni. 2020, no. 10, pp. 462–465.
12. Panfilov G.V., Nedoshvin S.V., Lazarev A.A. Active statistical analysis of systems with theoretical models for the conduct of machine experiment // Izvestiya Tula State University: Technical Sciences Series. 2014, no. 5, pp. 98–112.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.02.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 29.04.2024.

The article was submitted 27.02.2024; approved after reviewing 11.03.2024; assepted for publication 29.04.2024.