

Исследование предельных параметров процесса глубокой вытяжки листовых заготовок из жаропрочных медных сплавов

© 2022 г. Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов, Д.А. Никонов

Самарский национальный исследовательский университет (СНИУ)
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 20.02.2022 г., доработана 24.04.2022 г., подписана в печать 11.05.2022 г.

Аннотация: Исследован механизм процесса глубокой вытяжки тонкостенной заготовки в штампе с конической матрицей с определением предельного состояния формообразования, наступающего в момент отрыва дна в радиусной части пуансона, когда напряжения в меридиональном направлении достигают своего максимального значения. Это условие определено уменьшением размеров кромки заготовки на стадии замедленного упрочнения материала и уменьшения площади фланца заготовки, являющихся основными факторами, препятствующими процессу. Оно позволяет установить критерий, с помощью которого определяется предельный коэффициент вытяжки (отношение диаметра заготовки к диаметру детали), а именно, равенство меридиональных напряжений в зоне радиусного закругления пуансона и предела прочности материала. Установлено влияние прочностных свойств материала заготовки, трения и конусности матрицы на предельный коэффициент вытяжки. Выявлено, что изменение пластических и прочностных свойств жаропрочного медного сплава БрХ08 (пределов прочности и текучести) не влияет на величину констант упрочнения материала и практически не отражается на предельном коэффициенте вытяжки. Проведены комплексные исследования, включающие теоретический анализ и моделирование в программном продукте ANSYS/LS-DYNA с исходными данными для заготовки толщиной 1,35 мм и диаметром 100 мм из материала БрХ08. Представлены этапы компьютерного моделирования с указанием основных параметров процесса, таких как модель и механические характеристики материала заготовки, тип элементов, кинематические нагрузки, условия контактного взаимодействия элементов между собой и т.д. Результаты моделирования процесса подтвердили теоретические выводы, необходимые для реализации процесса без дефектов детали.

Ключевые слова: глубокая вытяжка, предельный коэффициент вытяжки, коническая матрица, ANSYS/LS-DYNA, напряжения.

Демьяненко Е.Г. — докт. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением (ОМД), СНИУ (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34). E-mail: e-dem@mail.ru.

Попов И.П. — докт. техн. наук, профессор кафедры ОМД, СНИУ. E-mail: igr_popov@mail.ru.

Никонов Д.А. — аспирант кафедры ОМД, СНИУ. E-mail: hel250@yandex.ru.

Для цитирования: Демьяненко Е.Г., Попов И.П., Никонов Д.А. Исследование предельных параметров процесса глубокой вытяжки листовых заготовок из жаропрочных медных сплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. № 6. С. 42–48. DOI: dx.doi.org/10.17073/0022-3438-2021-6-42-48.

Study of the limiting parameters of deep drawing of sheet blanks made of heat-resistant copper alloys

E.G. Demyanenko, I.P. Popov, D.A. Nikonov

Samara National Research University, Samara, Russia

Received 20.02.2022, revised 24.04.2022, accepted for publication 11.05.2022

Abstract: This article studies the mechanism of thin-walled workpiece deep drawing in the mould with a conical die and determines the forming limit state that occurs at the time of the bottom detachment in the radius part of the punch when stresses in the meridional direction reach their maximum value. This condition is determined by a decrease in the workpiece edge size at the stage of slow material hardening and a decrease in the workpiece flange area that are main factors hindering the process. This condition makes it possible to establish a criterion used to determine the limiting drawing ratio (ratio of the diameter of the workpiece to the diameter of the part), namely: equality of meridional stresses in the punch radius rounding area and the material tensile strength. The paper establishes the effect of the workpiece material strength properties, friction and die taper on the limiting drawing ratio. A change in the plastic and strength properties of the BrKh08 heat-resistant copper alloy (tensile strength, yield strength) does not affect the material hardening constant values and practically does not affect the limiting drawing ratio. The paper uses a comprehensive research method including theoretical analysis and modeling in the ANSYS/LS-DYNA

software with input data for the 1.35 mm thick workpiece 100 mm in diameter made of BrKh08. The article presents computer simulation stages indicating main process parameters such as the workpiece material model, mechanical properties, type of elements, kinematic loads, conditions of contact interaction between elements, etc. Process simulation results confirmed theoretical conclusions necessary for the process implementation without part defects.

Keywords: deep drawing, limiting drawing ratio, conical die, ANSYS/LS-DYNA, stresses.

Demyanenko E.G. — Dr. Sci. (Eng.), associate professor of the Department of metal forming, Samara National Research University (443086, Russia, Samara, Moscovskoe shosse, 34). E-mail: e-dem@mail.ru.

Popov I.P. — Dr. Sci. (Eng.), professor of the Department of metal forming, Samara National Research University. E-mail: igr_popov@mail.ru.

Nikonov D.A. — postgraduate student of the Department of metal forming, Samara National Research University. E-mail: hel250@yandex.ru.

For citation: Demyanenko E.G., Popov I.P., Nikonov D.A. Study of the limiting parameters of deep drawing of sheet blanks made of heat-resistant copper alloys. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 6. P. 42–48 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0022-3438-2021-6-42-48.

Введение

Осесимметричные тонкостенные оболочки широко применяются в аэрокосмической отрасли производства. Важной задачей, стоящей перед современной промышленностью при наращивании объемов изготовления изделий, является производство конкурентоспособной продукции, что стимулируют разработку новых методов формообразования тонкостенных деталей. Одним из таких способов, который может выступать в качестве самостоятельной предварительной операции или стадией формообразования, является глубокая вытяжка в штампе с конической матрицей [1]. Однако этот процесс ограничен возможностью появления гофр при формообразовании плоской заготовки в коническую чашку и обрывом в радиусной части пуансона. При относительной толщине заготовки (отношение толщины к ее диаметру) больше 0,013 коэффициент вытяжки (K_B) определяется только моментом разрушения заготовки в радиусной части пуансона.

Цель настоящей работы состояла в оценке зависимости предельного коэффициента вытяжки от механических свойств материала тонкостенной заготовки, геометрических размеров формообразующих частей матрицы и пуансона, а также определении значения предельного коэффициента вытяжки, обеспечивающего реализацию процесса глубокой вытяжки в коническую матрицу без дефектов.

Теоретический расчет предельного коэффициента вытяжки

В данном исследовании рассматривается штамп (рис. 1), который состоит из пуансона 1, матрицы 2 с конической и цилиндрической рабочими по-

верхностями, на которую устанавливается плоская заготовка. При опускании пуансона 1 заготовка прилегает к конической поверхности матрицы и вытягивается в деталь 3.

Определим предельный коэффициент вытяжки в случае обрыва дна в радиусной части пуансона в первом приближении с учетом трения, используя основные положения и допущения теории пластического деформирования листовых материалов [2–4]:

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \sigma_p - \sigma_\theta - \sigma_\theta f \operatorname{ctg} \alpha = 0, \quad (1)$$

где ρ — радиальная координата; σ_p — напряжения в меридиональном направлении, МПа; σ_θ — напряжения в тангенциальном направлении, МПа; f — коэффициент трения; α — угол конусности матрицы, град.

Будем считать, что упрочнение во всех элементах фланца заготовки одинаково и равно упрочнению кромки заготовки в момент максимального усилия. Запишем степенную функцию упрочнения как [5–8]

$$\sigma_s^* = A \varepsilon_\theta^n, \quad (2)$$

где A и n — константы упрочнения; σ_s^* — предел текучести материала заготовки с учетом упрочнения, МПа; ε_θ — тангенциальная деформация.

Определим интенсивность деформации следующим образом:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_\theta = \frac{R_{\text{заг}} - R_n}{R_{\text{заг}}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{заг}}$ — радиус кромки заготовки в момент наибольшего усилия, мм; R_n — текущий ра-

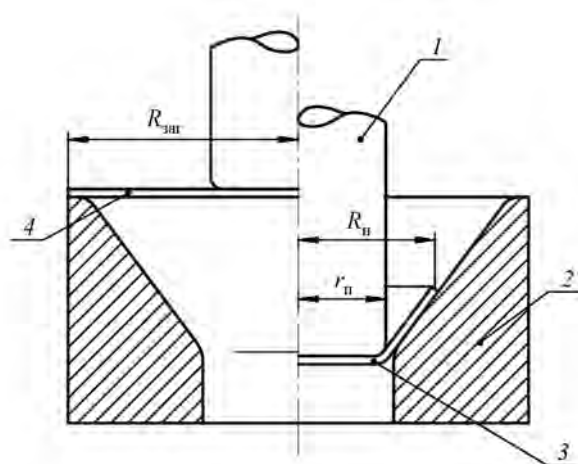


Рис. 1. Схема глубокой вытяжки в штампе с конической матрицей в исходном состоянии (слева) и на стадии формообразования (справа)

1 – пуансон, 2 – матрица с конической рабочей поверхностью, 3 – деталь, 4 – заготовка

Fig. 1. Diagram of deep drawing in the mould with a conical die in the initial state (on the left) and at the forming stage (on the right)

1 – punch, 2 – die with a conical working surface, 3 – part, 4 – workpiece

диус кромки заготовки, мм; $r_{\text{п}}$ – радиус пуансона, мм.

Найдем константы упрочнения:

$$n = \frac{\ln|\sigma_{\text{ш}} / \sigma_{0,2}|}{\ln|\delta_{\text{ш}} / 0,002|}, \quad A = \frac{\sigma_{\text{ш}}}{\delta_{\text{ш}}^n}, \quad (4)$$

где $\delta_{\text{ш}}$ – относительное удлинение в момент появления шейки при максимальном усилии; $\sigma_{\text{в}}$ – условный предел прочности, МПа; $\sigma_{\text{ш}} = \sigma_{\text{в}}(1 + \delta_{\text{ш}})$ – напряжения в момент появления шейки, МПа; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, МПа.

В момент максимальных меридиональных напряжений ($\sigma_{\text{р}}$) относительное сужение кромки заготовки в момент появления шейки ($\psi_{\text{ш}}$) определяется следующим образом:

$$X = \frac{R_{\text{заг}} - R_{\text{н}}}{R_{\text{заг}}} = \psi_{\text{ш}} \ln|K_{\text{в}}|, \quad (5)$$

$$\psi_{\text{ш}} = \frac{\delta_{\text{ш}}}{1 + \delta_{\text{ш}}}, \quad (6)$$

где $K_{\text{в}} = R_{\text{заг}}/R_{\text{дет}}$ – коэффициент вытяжки; $R_{\text{дет}}$ – радиус детали, мм.

Из формулы (5) выразим $R_{\text{н}}/R_{\text{заг}} \approx 1 - \psi_{\text{ш}} \ln|K_{\text{в}}|$ и преобразуем уравнение (2):

$$\sigma_s^* = AX^n = A\psi_{\text{ш}}^n (\ln|K_{\text{в}}|)^n. \quad (7)$$

При решении и упрощении выражения (1) с граничными условиями $\sigma_{\text{р max}} = 0$, $\rho = R_{\text{н}}$ возникает логарифм $\ln|R_{\text{н}}/R_{\text{дет}}|$, который можно представить в виде

$$\begin{aligned} \ln\left|\frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{дет}}}\right| &\approx \ln\left|\frac{R_{\text{н}} R_{\text{заг}}}{R_{\text{дет}} R_{\text{заг}}}\right| = \ln|K_{\text{в}}| + \ln\left|\frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{заг}}}\right| = \\ &= \ln|K_{\text{в}}| + \ln(1 - \psi_{\text{ш}} \ln|K_{\text{в}}|) = \ln|K_{\text{в}}| - \psi_{\text{ш}} \ln|K_{\text{в}}|. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, выражение (1) при граничных условиях $\sigma_{\text{р max}} = 0$ при $\rho = R_{\text{н}}$ с учетом (7) и (8) после решения примет вид [9–11]

$$\sigma_{\text{р max}} = A(1 + f \text{ctg} \alpha) \beta \psi_{\text{ш}}^n (\ln|K_{\text{в}}|)^n \ln|K_{\text{в}}| (1 - \psi_{\text{ш}}). \quad (9)$$

В условиях развитой пластической деформации в процессах обработки металлов давлением за момент начала разрушения принимается условие, при котором меридиональные максимальные напряжения в опасном сечении достигают значений напряжения начала образования шейки при линейном растяжении: $\sigma_{\text{ш}} = \sigma_{\text{в}}(1 + \delta_{\text{ш}})$.

Такое условие справедливо, когда рассматривается неравномерная деформация фланца, при которой заготовка более интенсивно упрочняется в области радиусного закругления цилиндрической части матрицы, где значения напряжений несколько больше, нежели на кромке заготовки. Однако в данном случае ввиду принятого допущения о том, что упрочнение всего фланца одинаково и равно упрочнению на кромке, для учета этой разницы напряжений за момент обрыва дна заготовки можно принять условие $\sigma_{\text{в}} = \sigma_{\text{р max}}$, которое широко встречается в теоретических расчетах [5, с. 151]. Таким образом, получим

$$(\ln|K_{\text{пред}}|)^{n+1} = \frac{\sigma_{\text{в}}}{A(1 + f \text{ctg} \alpha) \beta \psi_{\text{ш}}^n (1 - \psi_{\text{ш}})}, \quad (10)$$

$$K_{\text{пред}} = \exp\left[\frac{\sigma_{\text{в}}}{A(1 + f \text{ctg} \alpha) \beta \psi_{\text{ш}}^n (1 - \psi_{\text{ш}})}\right]^{\frac{1}{1+n}}, \quad (11)$$

где β – коэффициент Лодэ; $K_{\text{пред}}$ – предельный коэффициент вытяжки.

Рассмотрим задачу, рассчитав предельный коэффициент вытяжки с использованием формул

(2)–(11) для случая использования заготовки из жаропрочного сплава БрХ08 при коэффициенте трения $f = 0,1$. Учитывая свойства материала ($\sigma_b = 245$ МПа, $\delta_{ш} = 0,45$, $\psi_{ш} = 0,31$, $\sigma_{0,2} = 200$ МПа, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 1$) значение $K_{пред} = 2,38$.

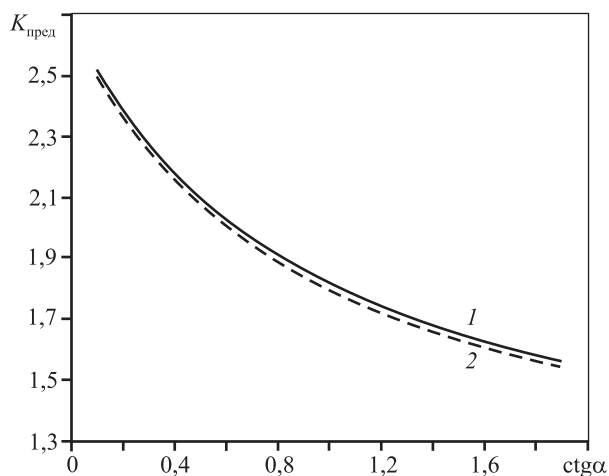


Рис. 2. Влияние угла конусности матрицы на предельный коэффициент вытяжки при разных значениях предела прочности
1 – $\sigma_b = 245$ МПа, 2 – 350 МПа

Fig. 2. Effect of die taper angle on limiting drawing ratio at different strength values

1 – $\sigma_b = 245$ МПа, 2 – 350 МПа

По предложенной методике определим влияние некоторых из параметров на предельный коэффициент вытяжки. Для анализа полученных результатов был построен график (рис. 2), который показывает, что с ростом угла конусности матрицы величина $K_{пред}$ уменьшается по экспоненциальной зависимости.

Компьютерное моделирование процесса глубокой вытяжки в коническую матрицу

Проведем компьютерное моделирование процесса вытяжки конической чашки в специализированном программном комплексе ANSYS/LS-DYNA (рис. 3), основанном на методе конечных элементов и предназначенном для расчетов быстротекущих процессов. Он идеально подходит для решения задач обработки металлов давлением, и в частности, холодной листовой штамповки. Программа ANSYS/LS-DYNA позволяет выявить опасные зоны и участки модели, в которых возможно разрушение, и определить все необходимые параметры:

- напряженно-деформируемое состояние заготовки и инструмента в любой точке и в любой момент времени;
- энергетические параметры процесса;

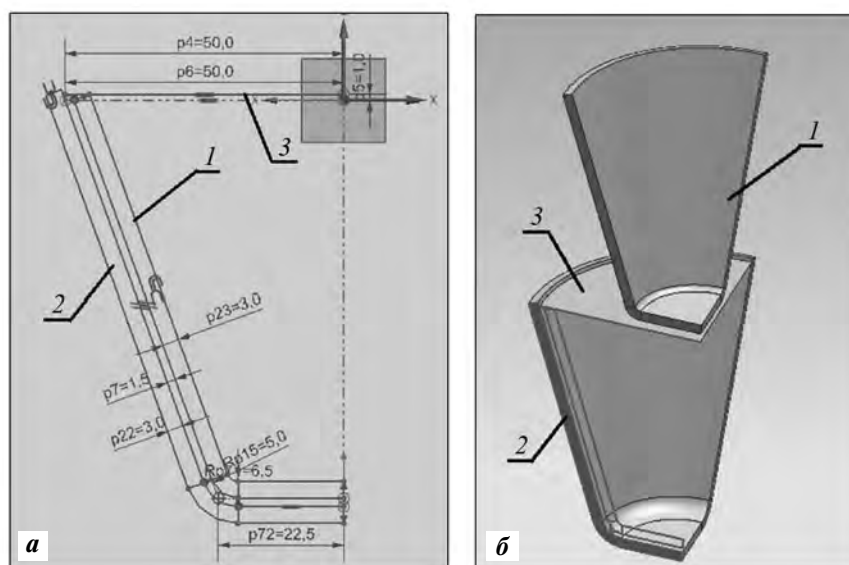


Рис. 3. Компьютерная модель оснастки в программе ANSYS/LS-DYNA

1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – заготовка

Fig. 3. Computer model of tooling in ANSYS/LS-DYNA

1 – punch, 2 – die, 3 – workpiece

— величины усилий и моментов, нормальных и касательных сил;
 — контактные параметры;
 — многое другое, что необходимо для понимания процессов, происходящих в заготовке.

В нашем случае использовалась тонкостенная заготовка из жаропрочного медного сплава БрХ08 толщиной $S_{\text{заг}} = 1,35$ мм и диаметром $D_{\text{заг}} = 100$ мм, свойства которой заложены в модель материала: плотность — 8900 кг/м^3 , модуль упругости — $1,12 \cdot 10^5$ МПа и коэффициент Пуассона — 0,35. Построенная для него аппроксимированная кривая упрочнения приведена на рис. 4. При моделировании процесса применялись как оболочные, так и объемные конечные элементы: для тонкостенной заготовки ($R_{\text{заг}} = 50$ мм) использовались элементы ThinShell 163, а для формообразующих частей оснастки (с геометрией $\alpha = 20^\circ$, $r_{\text{п}} = 21$ мм) — Solid 164 (твердое тело). Изображение модели с разбиением на конечные элементы приведено на рис. 5.

Выбранная геометрия соответствует реализации процесса со значением $K_{\text{пред}} = 2,38$, полученным аналитическим решением по предложенной методике (2)—(11).

На рис. 6 представлен график движения элементов штамповой оснастки и заготовки. Были выбраны следующие контактирующие поверхности: заготовка — пуансон и заготовка — матрица, согласно рис. 1. Коэффициент трения по закону Кулона одинаков для всех контактных пар и равен $f = 0,1$. Применялся кинематический тип внешней

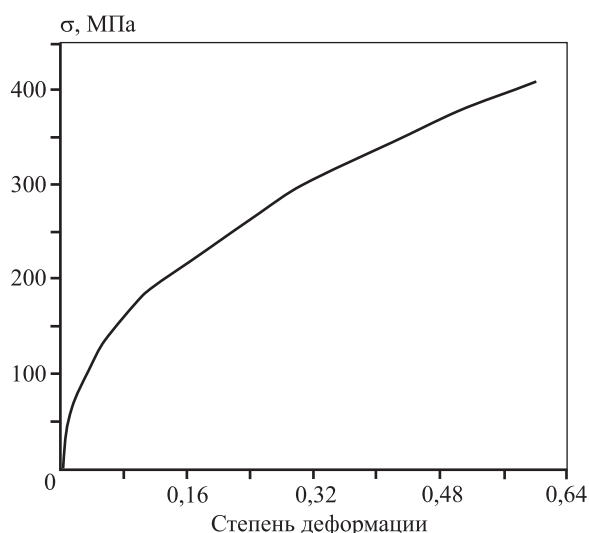


Рис. 4. Аппроксимированная кривая упрочнения для сплава БрХ08

Fig. 4. Approximated hardening curve for BrKh08 alloy



Рис. 5. Модель штамповой оснастки с разбиением на конечные элементы

Fig. 5. Mould tooling model with breakdown into finite elements

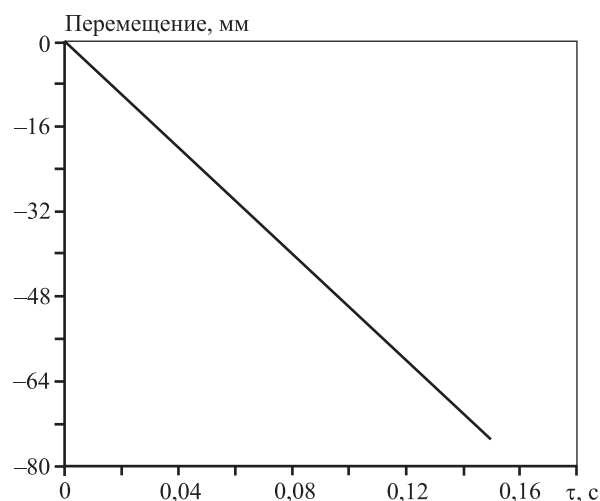


Рис. 6. Зависимость перемещения пуансона от времени

Fig. 6. Punch movement as a function of time

нагрузки (движение пуансона с заданной скоростью); на всю штамповую оснастку накладывалось ограничение на перемещение: RBUZ — только по оси Z [12—14].

Для того чтобы сократить время решения осесимметричной задачи, использовали 1/4 объема заготовки, заключенного между координатными плоскостями XOY и YOZ (ось OY совмещена с осью симметрии), при этом задавались соответствующие

шие граничные условия (ограничения на перемещение узлов, лежащих в плоскости симметрии). Установлены дополнительные ограничения степеней свободы:

— пуансон может двигаться только вдоль оси Z , а следовательно, для него ограничены перемещения вдоль осей X и Y и все повороты;

— неподвижные части оснастки (матрица) лишены всех степеней свободы.

Таким образом, в результате моделирования установлено напряженно-деформированное состояние заготовки и получены эпюры интенсивности напряжений (рис. 7), позволяющие сделать вывод, что значения меридиональных напряжений (σ_r) близки к пределу прочности в зоне ради-

усного перехода для предельного коэффициента вытяжки $K_{\text{пред}} = 2,38$, что подтверждает предложенную методику теоретического решения задачи по определению предельного коэффициента вытяжки заготовки в коническую матрицу [15, 16].

Заключение

Предложено аналитическое решение по определению предельного коэффициента глубокой вытяжки в штампе с конической матрицей. Его результат отражен при моделировании процесса в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA для случая использования заготовки из жаропрочного медного сплава БрХ08.

Полученные напряжения в заготовке в опасном сечении (в зоне радиусного перехода) соответствуют предельным значениям. Разница между ними и пределом прочности заготовки составляет не более 15 %, что обеспечивает реализацию процесса глубокой вытяжки в коническую матрицу без дефектов.

Установлено слабое влияние прочности материала на предельный коэффициент вытяжки: у жаропрочных медных сплавов с разницей предела прочности более 40 % коэффициент вытяжки отличается не более чем на 3 %.

Литература/References

1. Попов И.П. Штамп для вытяжки полых деталей: Пат. 852407 (СССР). 1981.
Popov I.P. Stamp for drawing hollow parts: Pat. 852407 (USSR). 1981 (In Russ.).
2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977.
Storozhev M.V., Popov E.A. Theory of metal forming. Moscow: Mashinostroyeniye, 1977 (In Russ.).
3. Мошин Е.Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей. М.: Машиностроение, 1973.
Moshnin E.N. Technology of stamping of large-sized parts. Moscow: Mashinostroyeniye, 1973 (In Russ.).
4. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979.
Romanovsky V.P. Handbook of cold forging. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1979 (In Russ.).
5. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1968.
Popov E.A. Fundamentals of the theory of sheet stamping. Moscow: Mashinostroyeniye, 1968 (In Russ.).

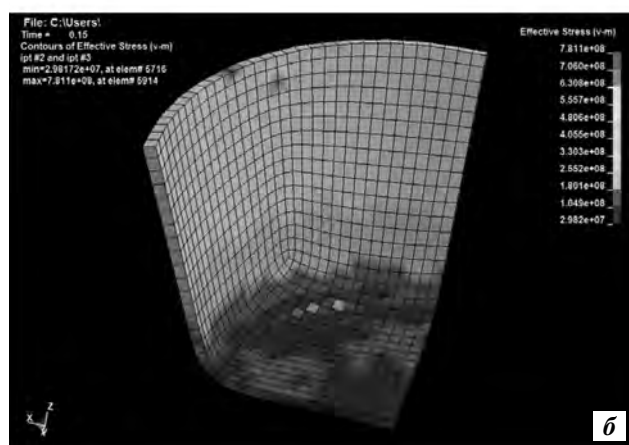
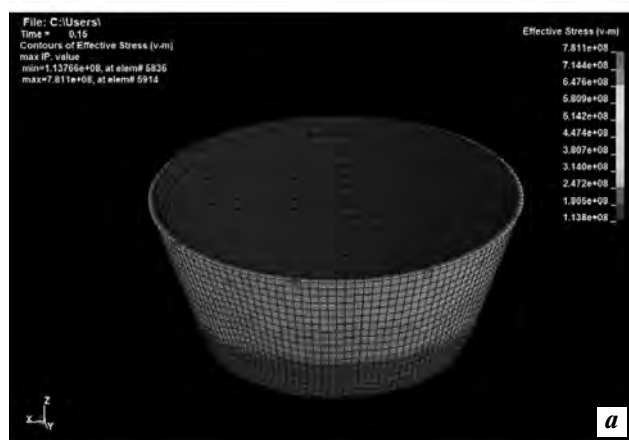


Рис. 7. Интенсивности напряжений при глубокой вытяжке заготовки из сплава БрХ08

а — распределение напряжений на целой детали,

б — распределение напряжений на четверти объема заготовки

Fig. 7. Intensities of stresses during BrKh08 workpiece deep drawing

а — stress distribution on the whole part,

б — stress distribution on the quarter of the workpiece volume

6. Pandre S., Morchhale A., Kotkunde N., Khanna N., Saxena A. Determination of warm deep drawing behavior of DP590 steel using numerical modeling and experimental process window. *Arab. J. Sci. Eng.* 2021. Vol. 46. P. 12537–12548.
7. Lu R., Liu Y., Yan M., Shen L., Huang H. Theoretical, experimental and numerical studies on the deep drawing behavior of Ti/Al composite sheets with different thickness ratios fabricated by roll bonding. *J. Mater. Proces. Technol.* 2021. Vol. 297. P. 117246.
8. Manabe K.I., Soeda K., Shibata A. Effects of variable punch speed and blank holder force in warm superplastic deep drawing process. *Metals*. 2021. Vol. 11. P. 493–509.
9. Ben-Elechi S., Khelifa M., Bahloul R. Sensitivity of friction coefficients, material constitutive laws and yield functions on the accuracy of springback prediction for an automotive part. *Int. J. Mater. Form.* 2021. Vol. 14. P. 323–340.
10. Khuanngern B., Suranuntchai S. Analysis and correction of defects for deep drawing process of stainless sink by use of finite element simulation. *Key Eng. Mater.* 2021. Vol. 889. P. 153–159.
11. Шинкин В.Н. Прямая и обратная нелинейная аппроксимация зоны упрочнения стали. *Черные металлы*. 2019. Т. 3. С. 32–37.
Shinkin V.N. Direct and inverse non-linear approximation of hardening zone of steel. *Chernye Metally*. 2019. Vol. 3. P. 32–37 (In Russ.).
12. Shinkin V.N. Elastoplastic flexure of round steel beams. 2. Residual stress. *Steel in Trans.* 2018. Vol. 48. P. 718–723.
13. Dwivedi R., Choubey A.K., Purohit R., Rana R.S. Experimental and numerical analysis of aluminum alloy cylindrical cup using novel deep drawing technique 889 KEM. *Adv. Mater. Proces. Technol.* 2021. P. 153–159.
14. Schuh G., Bergweiler G., Fiedler F., Bickendorf P., Schumacher P. Small series production and geometric analysis of sheet metal car body parts using forming tools made of fused filament fabricated PLA. In: *Proc. of IEEE. International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. 2020. December. P. 156–160.
15. Shinkin V.N. Simple analytical dependence of elastic modulus on high temperatures for some steels and alloys. *CIS Iron Steel Rev.* 2018. Vol. 15. P. 32–38.
16. Kumbhar S.V. Case studies in failure analysis through simulation of deep drawing process of sheet metal products: A brief. *J. Failure Analysis and Prevention*. 2021. Vol. 21(5). P. 1575–1581.
17. Sobotka J., Solfronk P., Korecek D., Pilar P. Influence of testing methodology on position of the forming limit curve. In: *Proc. of 29th Inter. Conf. on Metallurgy and Materials (METAL 2020)*. P. 234–239
18. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А. Математическая модель анизотропного упругопластического материала. *Машиностроение и энергетика*. 2011. No. 6. С. 73–80.
Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. Mathematical model of anisotropic elastoplastic material. *Mashinostroenie i energetika*. 2011. Vol. 6. P. 73–80 (In Russ.).
19. Khaimovich I.N., Khaimovich A.I. Design and implementation of a computer-aided design system for stamping titanium alloys compressor blades. *Bull. of Higher Educational Institutions. Non-ferrous metallurgy*. 2015. Vol. 2. P. 37–43.
20. Maslov V.D., Nikolenko K.A. ANSYS/LS-DYNA simulation of sheet stamping processes. Samara: SamSAU, 2007.
21. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. 2-е изд. М.: Наука, 1977.
Lekhnitskiy S.G. Elasticity theory of an anisotropic body. Moscow: Nauka, 1977 (In Russ.).
22. Rezhnikov A.F., Kochetkov A.V., Zakharov O.V. Mathematical models for estimating the degree of influence of major factors on performance and accuracy of coordinate measuring machines. *MATEC Web Conf.* 2017. Vol. 129. P. 01054.
23. Ranko Radonjic, Mathias Liewald, Fei Han. Optimisation of the blank holder stiffness in deep drawing processes by using FEA. In: *Proc. of European LS-DYNA Conference*. 2015, Würzburg, Germany. <https://www.dynalook.com/conferences/10th-european-ls-dyna-conference/3%20Process%20VI%20-%20Deep%20Drawing/03-Radonjic-UnivStuttgart-P.pdf>