
УДК 621.762.4

Расчет коэффициента жесткости напряженного состояния при осадке заготовки в бандаже

Шакиров А.В., Серегин А.М., Бабин Д.М.

В настоящей работе представлены результаты моделирования процесса осадки образцов заключённых в пластически деформируемый бандаж с кольцевыми проточками. Для этого разработана и численно реализована имитационная модель процесса осадки. Расчеты выполнены для различных температур (20, 300 и 450°C), степени деформации (20% и 40%) системы и толщины стенки бандажа ($S = 3$ мм, 4 мм, 6 мм, 8 мм). На основе полученных расчетных данных, построены графические зависимости, отражающие влияние технологических параметров процесса (температура и степень деформации) и геометрических параметров бандажа (толщина стенки) на изменение коэффициента жесткости напряженного состояния. Показано, что увеличение толщины стенки бандажа и температуры системы ведет к росту коэффициента жесткости напряженного состояния.

Ключевые слова: математическое моделирование, коэффициент жесткости напряженного состояния, осадка в бандаже.

Calculation of stiffness stress state at draft of workpiece in the shroud

Shakirov A.V., Seregin A.M., Babin D.M.

This paper presents the results of the modeling process, rainfall patterns enclosed in the plastically deformable band with annular groove. To this end, we developed and implemented numerical simulation model of rainfall. The calculations were performed for various temperatures (20, 300 and 450 ° C), the degree of deformation (20% and 40%) of the shroud and the wall thickness ($S = 3$ mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm). On the basis of the calculated data are constructed a graph reflecting the influence of the process parameters (temperature and the degree of deformation) and geometric parameters of the shroud (wall thickness) to change stiffness stress. It is shown that with the increase in wall thickness of the shroud and temperature of the system leads to increased stiffness stress.

Keywords: mathematical modeling, stiffness coefficient of stress state, the sediment in the shroud.

Введение

Одним из широко распространенных методов получения некомпактных материалов, в том числе и композиционных, является метод механической активации.

В процессе механической активации частицы исходной шихты испытывают высокоэнергетическое механическое воздействие, что с одной стороны, как и в процессах интенсивной пластической деформации [1], ведет к повышению свойств матричного материала за счет уменьшения размера кристаллитов. С другой стороны, происходит внедрение частиц упрочняющей фазы в матрицу [2]. Изучение процессов консолидации некомпактных

материалов, в том числе и композиционных, за счет обработки давлением представляет практический и научный интерес [3].

Одним из важных параметров, характеризующих протекание процессов залечиваемости дефектов (пор) при консолидации является коэффициент жесткости напряженного состояния. На основе данной величины возможно построение диаграмм залечиваемости дефектов [4].

Целью данной работы является разработка математической модели и исследование изменения коэффициента жесткости напряженного состояния при осадке цилиндрической заготовки в бандаже.

Методика исследования

Объектом исследования является процесс осадки цилиндрической заготовки в пластически деформируемом бандаже с кольцевыми проточками. На рис. 1 представлена схема, дающая представление о процессе.

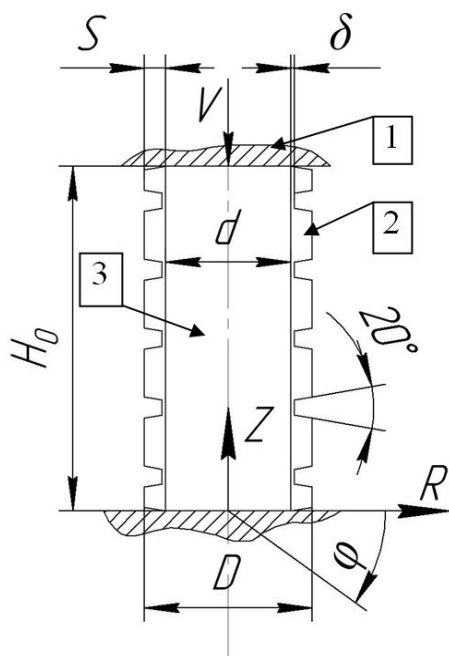


Рис. 1. Схема осадки заготовки цилиндрической формы в комбинированной оболочке (бандаже): 1 – плоские бойки, 2 – бандаж с кольцевыми проточками, 3 – заготовка цилиндрической формы. Буквенные обозначения: H_0 – начальная высота заготовки; D – диаметр бандажа; d – диаметр цилиндрической заготовки; V – скорость осадки; S – ширина бандажной стенки; δ – толщина перемычки между соседними кольцами бандажа; Z, R, φ – полярные координаты.

Образец, помещённый в бандажные кольца, при осевой нагрузке осаживается по высоте, увеличивается в диаметре и создаёт внутреннее давление, под действием которого бандажные кольца испытывают радиальное растяжение, создавая боковое давление на испытываемый образец. Изучение процесса осадки и установление влияния толщины стенки бандажа, температуры процесса осадки и степени деформации на коэффициент жесткости напряженного состояния проводили на

основе численного эксперимента. При расчетах, заготовке соответствовали свойства АМг2, а бандажу – Д16. Постоянными параметрами численного эксперимента являлись: скорость осадки $V = 50$ мм/с, толщина перемычки между соседними кольцами бандажа $\delta = 0,5$, начальная высота заготовки $H_0 = 50$ мм и ее диаметр $d = 18$ мм. К варьируемым параметрам относили температуру системы в процессе осадки θ , степень деформации заготовки ε и толщину стенки бандажа S .

Температуру системы при расчетах принимали 20, 300 и 450°C. Степень деформации ε определяли величиной осадки образца $\varepsilon = \ln(H_0/H)$. Расчеты выполняли до достижения ε величины 20 и 40%. Толщину стенки бандажа $S = (D - d)/2$ в расчетах изменяли в диапазоне 3...8 мм. Таким образом, вычислительный эксперимент включал 24 расчета.

После расчетов изучали изменение показателей напряженно-деформированного состояния, на основе которых вычисляли значения коэффициент жесткости напряженного состояния η для каждого варианта расчета. Коэффициент жесткости напряженного состояния рассчитывали как $\eta = 3\sigma/\sigma_{и}$, где σ – среднее напряжение (гидростатическое давление); $\sigma_{и}$ – интенсивность напряжений.

Математическая постановка задачи моделирования

Постановка задачи расчета локальных параметров пластического течения материала может быть описана следующим образом.

Расчетная область D образована $D_1 \cup D_2$.

Пусть в расчетной области D , ограниченной поверхностями S напряжения, скорости, скорости деформаций и температура удовлетворяют следующим уравнениям:

уравнению движения без учета массовых сил

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

кинематическому соотношению

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = (v_{i,j} + v_{j,i})/2 \quad (2)$$

уравнению теплопроводности

$$c\rho\dot{\theta} = \lambda_{\parallel}\theta_{,ii} + q \quad (3)$$

реологическому соотношению

$$\sigma_S = \sigma_S(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \theta) \quad (4)$$

условию пластичности Сен-Венана-Мизеса:

$$s_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (5)$$

Здесь и далее σ_i – компоненты вектора скорости; σ_{ij} и s_{ij} – компоненты тензора и девиатора напряжений; σ и σ_S – среднее напряжение (гидростатическое давление) и напряжение текучести; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненты тензора скоростей деформации; θ – температура материала; ρ – плотность материала; c – удельная теплоемкость материала; λ – коэффициент теплопроводности материала; q – внутренний источник тепла; $\bar{\sigma}_u$ и $\dot{\varepsilon}_u$ – интенсивность приведенных напряжений и скоростей деформаций; τ – напряжение трения; m – фактор трения; θ_S – температура поверхности заготовки; $\theta_{\text{инстр}}$ – температура поверхности инструмента; χ – коэффициент относительного теплообмена, учитывающий наличие промежуточного слоя; η – коэффициент, определяющий, какая часть энергии деформирования переходит в тепловую энергию.

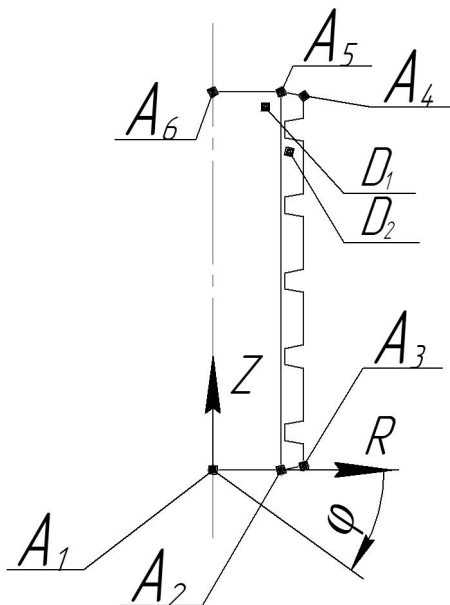


Рис. 2. Расчетная схема.

Зафиксируем время в начальный момент и рассмотрим граничные условия для расчетной области D полагая, что $S = S_\sigma \cup S_v \cup S_\tau \cup S_\beta$.

Запишем механические граничные условия. На свободной поверхности $S_\sigma = A_4A_3$ заданы напряжения:

$$\forall(R, Z, \varphi) \in S_\sigma: \sigma_{ij}n_j = 0 \quad (6)$$

На верхней торцевой поверхности $S_v = A_6A_5A_4$ заданы скорости, условие непроницаемости и закон трения:

$$\forall(R, Z, \varphi) \in S_v: v_i = 0 \quad (7)$$

$$\forall(R, Z, \varphi) \in S_v: v_i n_i = 0 \quad (8)$$

$$\forall(R, Z, \varphi) \in S_v: \tau = m \cdot \sigma_S \quad (9)$$

На нижней торцевой поверхности $S_\tau = A_1A_2A_3$ заданы условие непроницаемости и закон трения:

$$\forall(R, Z, \varphi) \in S_\tau: v_i n_i = 0 \quad (10)$$

$$\forall(R, Z, \varphi) \in S_\tau: \tau = m \cdot \sigma_S \quad (11)$$

На границе раздела областей D_1 и D_2 , $S_\beta = A_2A_5$ задано условие непроницаемости:

$$\forall(R, Z, \varphi) \in S_\beta: v_i n_i = 0 \quad (12)$$

Тепловые граничные условия для поверхностей, составляющих поверхность S имеют вид:

$$\forall(R, Z, \varphi) \in S_v: q = \chi(\theta_S - \theta_{\text{инстр}}) \quad (13)$$

$$\forall(R, Z, \varphi) \in S_\tau: q_f = \tau \cdot |v_S| \quad (12)$$

Внутренний тепловой поток, в выражении (3), представляющий собой выделяющееся в процессе формоизменения тепло, равен:

$$q = \eta \cdot \bar{\sigma}_u \cdot \dot{\varepsilon}_u \quad (14)$$

Реологическое соотношение (4) для материала заготовки задавали таблично. Для описания реологических свойств Д16 использовали модель Джонсона-Кука [5]:

$$\sigma_S = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*) \right) (1 - \theta^{*p}), \quad (15)$$

где θ^* – гомологическая температура; A – статический предел текучести; B – модуль деформационного упрочнения; n – показатель степени в законе деформационного упрочнения; C – коэффициент скорости деформаций; p – показатель степени в законе температурного разупрочнения. Следует отметить, что Джон-

сон и Кук представляют гомологическую температуру как:

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r}, \quad (16)$$

где θ – температура образца; θ_r – комнатная температура; θ_m – температура плавления материала.

Материальные константы модели (15) представлены в таблице 1.

При решении задачи (1)-(5) с механическими (6)-(12) и тепловыми (13)-(14) граничными условиями использовали алгоритм метода конечных элементов, реализованный в программном комплексе Deform [6].

Результаты и их обсуждение

Численная реализация разработанной модели позволила получить количественные оценки изменения показателей напряженно-деформированного состояния расчетной области. Анализ расчетных картин напряжений показывает, что поля напряжений достаточно однородны. В таблице 2 представлены результаты теоретического исследования процесса осадки заготовки в пластически деформируемом бандаже. В числителе представлены значения коэффициента жёсткости напряженного состояния для степени деформации 20%, в знаменателе для 40%.

Таблица 1

Материальные константы модели Джонсона-Кука для сплава Д16.

$T_r, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$	$A, \text{МПа}$	$B, \text{МПа}$	C	n	p
20	650	-547,281	690,773	0,0352688	0,0374071	0,600648

Таблица 2

Значения коэффициента жёсткости напряжённого состояния.

d/D \ $\theta, ^\circ\text{C}$	20	300	450
0,75	1,13/1,15	1,20/1,22	1,74/1,79
0,69	1,16/1,20	1,16/1,25	1,99/2,05
0,60	1,24/1,29	1,38/1,44	2,42/2,40
0,53	1,29/1,35	1,45/1,51	2,73/2,51

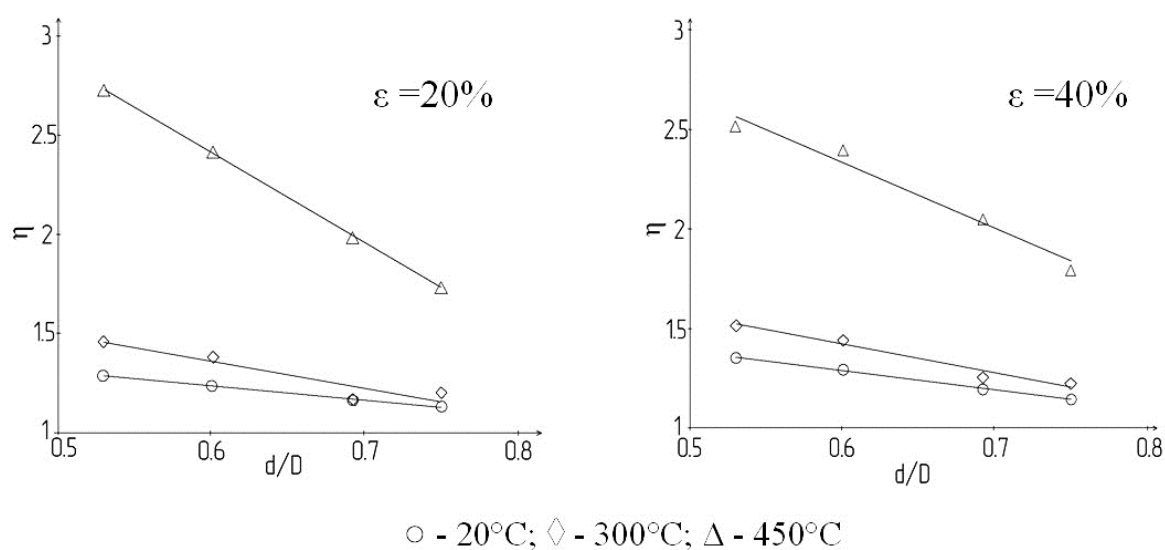


Рис. 3. Влияние технологических и геометрических параметров процесса осадки в бандаже на коэффициент жесткости напряженного состояния

Аппроксимацию, полученных расчетных данных и построением графических зависимостей осуществляли с помощью математического комплекса Mathcad. На рис. 3 представлены графические зависимости отражающие влияние d/D на коэффициент жесткости напряженного состояния при разных степенях деформации.

Анализ графических зависимостей показывает, что характер зависимостей для всех опытов одинаков (линейный), отличается лишь их наклон. Увеличение толщины стенки и температуры системы ведет к росту коэффициента жесткости напряженного состояния. Причем, влияние температуры выражено более ярко. Например, при увеличении толщины стенки банджа от 3 мм до 8 мм величина коэффициента жесткости напряженного состояния возрастает на 14% (при 20°C), 26% (при 300°C) и 57% (450°C). Величина степени деформации не оказывает существенного влияния на коэффициент жесткости напряженного состояния.

Заключение

Разработана и численно реализована имитационная модель для качественного и количественного описания пластического течения и распределения напряжений в процесс осадки цилиндрической заготовки в пластически деформируемом бандже с кольцевыми проточками. Получены численные значения влияния технологических параметров процесса (температура и степень деформации) и геометрических параметров банджа (толщина стенки) на изменение коэффициента жесткости напряженного состояния. Расчетным путем установлено, что доминирующим фактором, оказывающим влияние на величину коэффициента жесткости напряженного состояния, является температура. Толщина стенки банджа также оказывает влияние на величину коэффициента жесткости напряженного состояния. Однако при разной степени деформации влияние толщины стенки банджа, примерно, одинаково.

Литература

1. *Аборкин А.В., Бабин Д.М., Захаров А.А.* Влияние числа проходов при равноканальном угловом прессовании на эксплуатационные свойства алюминиевого сплава // *Материаловедение*, 2013, № 11. – С 33-38.

2. *Аборкин А.В., Залеснов А.И., Бабин Д.М., Стариков А.В.* Исследование структурно-фазового состава и механических свойств композиционного материала Al-2Mg-nC // *Научные труды IV-й Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении»*. – М.: Издательский дом «Спектр», 2015. – С. 15-17.

3. *Аборкин А.В., Елкин А.И., Бабин Д.М.* Особенности изменения энергосиловых параметров, температуры и гидростатического давления при непрерывном прессовании некомпактного алюминиевого материала // *Известия вузов. Цветная металлургия*, 2015. №6. –С. 23-29.

4. *Шестаков Н.А., Субич В.Н., Демин В.А.* Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 272 с.

5. *Johnson G. R., Cook W. H.* A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // *Proceedings of the 7-th International Symposium on Ballistics*. – The Hague, The Netherlands. 1983. – P. 541-547.

6. Моделирование и исследование технологических процессов обработки металлов давлением: монография / *А.В. Белевич, Д.М. Бабин, Ю.А. Гладков, А.В. Аборкин, А.А. Захаров*; Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2012. – 182 с.

References

1. *Aborkin A.V., Babin D.M., Zaharov A.A.* Vlijanie chisla prohodov pri ravnokanal'nom uglovom pressovanii na jekspluatacionnye svojstva aljuminievogo splava [Effect of the number of passes in equal channel angular pressing on the performance properties of the aluminum alloy] // *Materialovedenie [Materials Science]*, 2013, № 11. – P 33-38.

2. *Aborkin A.V., Zalesnov A.I., Babin D.M., Starikov A.V.* Issledovanie strukturno-fazovogo sostava i mehanicheskikh svojstv kompozicionnogo

materiala Al-2Mg-nC [Investigation of the structure and phase composition and mechanical properties of the composite material Al-2Mg-nC] // Conference Proceedings «Fundamental'nye issledovaniya i innovacionnye tehnologii v mashinostroenii». – Moscow.: «Spectr», 2015. – P. 15-17.

3. *Aborkin A.V., Elkin A.I., Babin D.M.* Osobnosti izmeneniya jenergosilovykh parametrov, temperatury i gidrostaticheskogo davleniya pri ne-preryvnom pressovanii nekompaktnogo aljuminievogo materiala [Features of change of power parameters, temperature and hydrostatic pressure in a continuous extrusion of non-compact aluminum material] // Izvestiya vuzov. Cvetnaja metallurgiya [Proceedings of the universities. Non-ferrous metallurgy], 2015. №6. – S. 23-29.

4. *Shestakov N.A., Subich V.N., Demin V.A.* Uplotnenie, konsolidacija i razrushenie poristykh materialov

[Seal, consolidation and destruction of porous materials]. – Moscow: FIZMATLIT, 2009. – 272 p.

5. *Johnson G. R., Cook W. H.* A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7-th International Symposium on Ballistics. – The Hague, The Netherlands. 1983. – P. 541-547.

6. Modelirovanie i issledovanie tehnologicheskikh processov obrabotki metallov davleniem: monografiya [Simulation and research of technological processes of metal forming: monograph] / *A.V. Belevich, D.M. Babin, Ju.A. Gladkov, A.V. Aborkin, A.A. Zaharov*; Vladimirsij gosudarstvennyj universitet imeni Aleksandra Grigor'evicha i Nikolaja Grigor'evicha Stoletovykh. – Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2012. – 182 p.

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2015 г.

Шакиров Артем Владимирович – студент кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия. E-mail: nefomal@yandex.ru

Серегин Артем Михайлович – магистрант кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия. E-mail: artemmtrp@mail.ru

Бабин Дмитрий Михайлович – ассистент колледжа инновационных технологий и предпринимательства, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия. E-mail: necros-m2@yandex.ru

Shakirov Artem Vladimirovich – Student, Vladimir State University, Vladimir, Russia. E-mail: nefomal@yandex.ru

Seregin Artem Mikhajlovich – master student, Vladimir State University, Vladimir, Russia. E-mail: artemmtrp@mail.ru

Babin Dmitriy Mikhajlovich – assistant, Vladimir State University, Vladimir, Russia. E-mail: necros-m2@yandex.ru