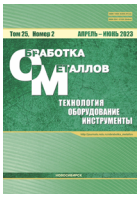
Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 2 с. 17–31
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-17-31

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Аналитическая модель равноканального углового прессования титановой губки

Иван Березин [1, 2, a], ***Александр Залазинский*** [3, b], ***Денис Крючков*** [3, c, *]

[1] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия
[2] ООО «Гайд Системс», ул. Родонитовая, 18б, г. Екатеринбург, 620089, Россия
[3] Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-8674-3352, i.m.berezin@urfu.ru, [b] https://orcid.org/0000-0001-8352-5475, zalaz@list.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0001-8585-3544, kru4koff@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7

История статьи:
Поступила: 28 февраля 2023
Рецензирование: 29 марта 2023
Принята к печати: 28 апреля 2023
Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:
Модель
Равноканальное угловое прессование
Титановая губка
МКЭ

Финансирование
Работа выполнена в рамках программы ФНИ государственных академий наук по теме № 0391-2019-0005 «Разработка научных основ проектирования оптимальных технологий пластического формоизменения металлических материалов с гарантированным уровнем сплошности и физико-механических свойств».

Благодарности
Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение равноканального углового прессования (РКУП) металлического порошка позволяет получить практически беспористые заготовки с высокой твердостью, высоким уровнем накопленной деформации и образованием ультрамелкозернистой структуры. Актуальным вопросом для исследования полунепрерывного процесса РКУП остается надежная оценка энергосиловых параметров процесса и прогнозирование пористости спрессованных материалов. Это, в свою очередь, связано с необходимостью разработки достаточно точных, надежных и простых для практического применения математических моделей. **Целью работы** является разработка аналитической модели процесса равноканального углового прессования пористого материала. В качестве модели материала для исследования выбран порошкообразный отсев губчатого титана марки ТГ-100. **Объектом исследования** является процесс полунепрерывного равноканального углового прессования осесимметричного пористого брикета титановой губки в канале пресс-формы. Предполагается, что при РКУП используется пуансон для создания противодавления. Для решения определены схема процесса, статически допустимая схема нагрузки на слой интенсивной деформации и кинематически допустимая схема течения пластически сжимаемой среды в слое. В соответствии с принятыми схемами построена система уравнений, применяется уравнение баланса мощности. Аналитическое уравнение решается методом последовательных приближений. Осуществлено имитационное моделирование методом конечных элементов процесса РКУП пористого титана при углах пересечения каналов пресс-формы в 45°, 50°, 55° и 60°. Определена пористость заготовки на разных стадиях процесса РКУП. С использованием аналитического решения и конечно-элементного моделирования получена диаграмма изменения давления на пуансон. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что результаты аналитического решения согласуются с данными имитационного конечно-элементного моделирования. Наибольший уровень напряжений возникает в процессе равноканального углового прессования при α = 45°, однако при этом распределение относительной плотности по сечению наиболее равномерно. При увеличении угла α максимальное значение давления на рабочий пуансон уменьшается. Рациональные технологические параметры прессования пористых заготовок должны обеспечивать максимально допустимые давления на деформирующий инструмент. Согласно этому условию в каждом конкретном процессе РКУП из аналитического решения возможно определить оптимальное значение угла.

Для цитирования: *Березин И.М., Залазинский А.Г., Крючков Д.И.* Аналитическая модель равноканального углового прессования титановой губки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 17–31. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-17-31.

Введение

Сущность процесса интенсивной пластической деформации (ИПД) заключается в пластической обработке, осуществляемой при температурах ниже порога рекристаллизации

***Адрес для переписки**
Крючков Денис Игоревич, к.т.н., научный сотрудник
Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова
Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34,
620049, г. Екатеринбург, Россия
Тел.: 8 (343) 374-50-51, **e-mail:** kru4koff@bk.ru

деформируемого материала, с высоким уровнем накопленной деформации и приводящей к образованию ультрамелкозернистых структур в металлах. Известно довольно много методов ИПД: кручение под высоким давлением [1], пакетная прокатка [2], всесторонняя ковка [3], циклическое выдавливание и сжатие, также называемые «прессованием в виде песочных часов» [4], равноканальное угловое прессование [5] и др. Подробный обзор методов ИПД выполнили Р.З. Валиеев и др. [6] и В.М. Сегал [7]. Стремление к повышению показателей производительности процессов ИПД стимулировало разработку различных способов непрерывного прессования. К способам непрерывного прессования, нашедшим наиболее широкое применение в промышленности, относятся конформ (формование длинномерного металлопроката методом непрерывного выдавливания), линекс [8] и совмещенная прокатка-прессование [8–9]. В работе В.М. Сегала [10] были рассмотрены теоретические аспекты процесса, объединяющего методы равноканального углового прессования и конформ.

ИПД порошковых и пористых материалов реализует сложное напряженно-деформированное состояние, характеризуемое совместным объемным сжатием и сдвигом [11]. Процесс консолидации из чистого алюминиевого порошка методом равноканального углового прессования с кручением описан в работе [5], где показано, что многократное повторение ИПД позволяет накапливать структурные изменения в материале. Это способствует более эффективному закрытию крупных дефектов строения, а также повышает количество и размеры участков механического сцепления частиц за счет инициирующего влияния сдвиговой деформации. В работе [12] показано, что ИПД для пористого титана и пористого титан-магниевого композита позволяет получить ультрамелкозернистую структуру и хороший контакт между частицами.

Особый интерес вызывает метод равноканального углового прессования (РКУП) порошковых и пористых материалов. В работе [13] показано, что применение РКУП металлического порошка позволяет получить практически беспористые заготовки с высокой твердостью даже после однократного прессования. Однако особенно важным преимуществом РКУП является возможность консолидации порошковых и пористых материалов при более низких температурах в сравнении с температурой, необходимой при традиционных методах порошковой металлургии [14].

Вместе с тем большой практический интерес представляет получение полуфабрикатов из порошкообразного сырья труднодеформируемых и малопластичных сплавов и металлов, таких как титан, с однородными свойствами и минимальной пористостью. Уменьшение стоимости титановых порошковых изделий напрямую зависит от удешевления методов производства и обработки давлением титановых порошков. Большой интерес вызывают методы производства порошкового титана, близкого по своим физико-механическим свойствам и морфологии отдельных частиц к губчатому титану, полученному традиционным методом Кролла. Компанией International Titanium Powder (Cristal US Inc., США) разработан процесс получения титанового порошка (Armstrong process), пригодного для изготовления методом порошковой металлургии деталей ответственного назначения. Chen и соавторы [15] изучили процесс холодного компактирования Armstrong-порошков системы Ti-6Al-4V. По данным, приведенным в работе [16], указанная технология позволяет снизить стоимость производства готовых титановых изделий не менее чем в два раза. Авторы работы [17] представили электрохимический метод (Cambridge process) для прямого восстановления твердого TiO_2. Технология Rapid Plasma Quench Process (Idaho Titanium Technologies, USA) основана на использовании энергии высокотемпературной плазмы и позволяет снизить стоимость производства высококачественного титанового порошка [18]. В работе [19] предложен способ получения дешевого титанового порошка из титановой губки с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Применение методов интенсивной пластической деформации для указанных материалов позволит получать высокоплотные заготовки без применения традиционной энерго- и трудозатратной технологии производства титана.

Стоит отметить, что измельченная титановая губка и порошковые композиции на ее основе являются перспективными материалами для из-

готовления порошковых титановых изделий, от которых требуется высокая коррозионная стойкость, малая масса и удовлетворительные прочностные свойства при низкой стоимости исходного сырья. Компания NORSK Titanium (Норвегия) получила два патента на производство сварочной проволоки непосредственно из титановой губки (Patent WO2011049465, Patent WO2012127426). В работе [20] исследовано влияние комбинированной обработки, включающей наводораживание / удаление водорода и прокатку, на структуру и механические свойства плит из губчатого титана, спрессованных ударной волной. Авторы работы [21] показали возможность применения пористого материала на основе гранул титановой губки при производстве имплантов для остеоинтеграции. В работе [22] исследован процесс одноосного прессования в матрице губчатого порошка титана. В работах [23–25] исследовано влияние легирования водородом на свойства брикетов, изготовленных из губчатого титана прессованием.

Разнообразие технологий получения полуфабрикатов и реологические особенности порошкообразного титана приводят к необходимости предварительных расчетов с целью разработки конкретных технических устройств для их реализации. Актуальным вопросом для исследования полунепрерывного равноканального углового прессования (РКУП) до настоящего времени остается надежная оценка энергосиловых параметров процесса и прогнозирование пористости спрессованных материалов. Это, в свою очередь, связано с необходимостью разработки достаточно точных, надежных и простых для практического применения математических моделей.

Цель работы: для совершенствования технологических процессов изготовления заготовок и изделий разработать модель процесса полунепрерывного равноканального углового прессования титансодержащего сырья.

Для достижения поставленной цели необходимо определить схему равноканального углового прессования, статически допустимую схему нагрузки на слой интенсивной деформации и кинематически допустимую схему течения пластически сжимаемой среды в слое; построить систему уравнений и сравнить решение, получаемое с помощью разработанной системы уравнений, с решением методом конечных элементов.

Материал и методика исследования

Объектом исследования является процесс полунепрерывного равноканального углового прессования (РКУП) осесимметричного пористого брикета (ϑ_b – исходная пористость) титановой губки в канале пресс-формы, имеющей входную часть *6* и пересекающую ее под углом 2α выходную часть *5* (рис. 1). Протяженность заготовки во входной и выходной частях канала в текущий момент времени – L_1 и L_2 соответственно; L_b – исходная длина брикета, dl – перемещение рабочего пуансона *1*; D – диаметр канала. Пуансон *1* создает давление P_1 на брикет. Устройство содержит также пуансон *2* для создания противодавления (давления P_2, препятствующего истечению деформируемого материала из канала пресс-формы). Пуансон *2* используется в первом цикле прессования. Во втором и последующих циклах противодавление создает пресс-остаток *4* предшествующего цикла. Течению деформируемого материала в канале пресс-формы препятствуют силы трения на поверхности выдавливаемой заготовки.

Угловое прессование обеспечивает интенсивные пластические деформации сдвига в тонком слое, расположенном в окрестности сечения А–В (рис. 1) и разделяющем входную I и выходную II части канала пресс-формы. При этом в результате объемного сжатия и интенсивной деформации сдвига в слое А–В уменьшается пористость титановой губки. Во входной части *6* пресс-формы деформируемый материал испытывает напряженное состояние, подобное обычному прессованию пластически сжимаемой массы в закрытой пресс-форме [26, 27].

В качестве материала для исследования использовали порошкообразный губчатый титан марки ТГ-100 (состав соответствует ГОСТ 17747–79) (рис. 2) без дополнительной обработки (просеивания, вторичного дробления, очистки и др.). Предполагается, что материал титановой губки предварительно компактируется двухсторонним прессованием до брикетов с относительной пористостью $\vartheta_b = 0,4$. Материал брикетов считали однородным в статистическом смысле.

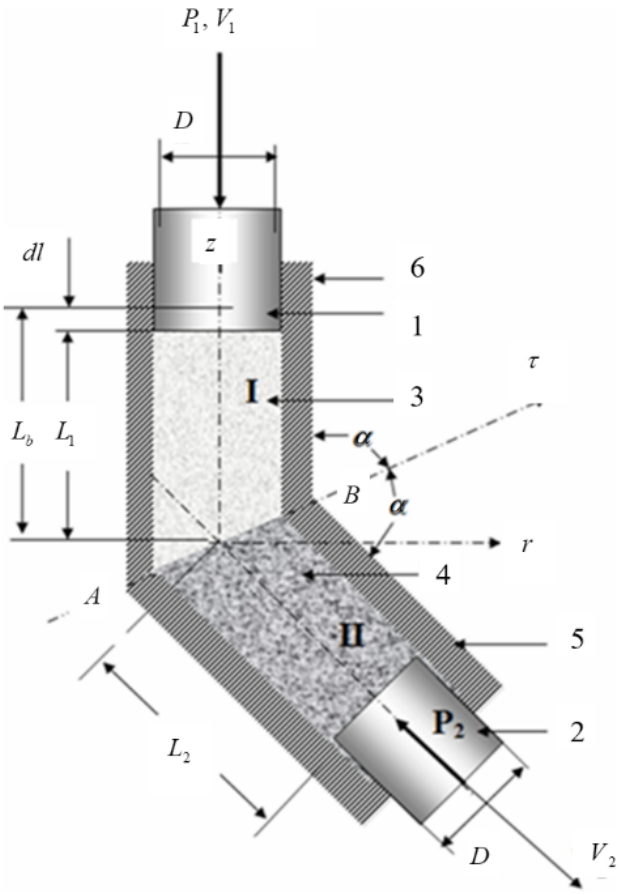
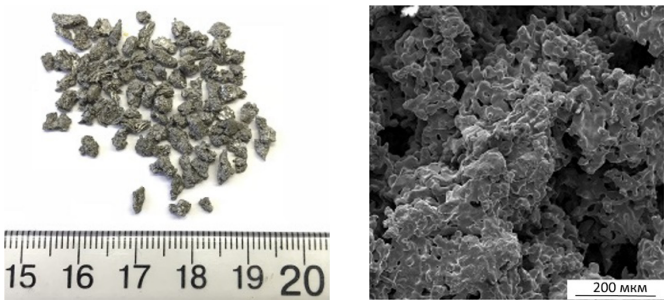


Рис. 1. Схема равноканального углового прессования:

1 – пуансон, создающий рабочее давление; *2* – пуансон, создающий противодавление; *3* – часть выдавливаемой заготовки (брикета); *4* – пресс-остаток (спрессованная часть заготовки); *5*, *6* – части пресс-формы с выходным II и входным I каналами

Fig. 1. Scheme of equal-channel angular pressing:

1 – punch creating working pressure; *2* – punch for back pressure; *3* – part of the extruded blank; *4* – pressed part of the blank; *5*, *6* – parts of the a pressing tool with output II and input I channels



а *б*

Рис. 2. Титановая губка (*а*); морфология частицы (*б*)

Fig. 2. Titanium sponge (*а*); particle morphology (*б*)

Результаты и их обсуждение

В каждом цикле равноканального углового прессования выделяется две стадии. В первой стадии процесса обрабатываемый материл в части II канала пресс-формы не деформируется, при этом в части I осуществляется одноосное сжатие пористой массы. Перемещение dl пуансона *1* приводит к возникновению и росту усилия прессования P_1, которое достигает некоторого максимального значения P_1^*, соответствующего общему течению деформируемого материала в канале пресс-формы. Действие контактного трения в пресс-форме приводит к снижению давлений в сжимаемых частицах по мере движения их вдоль линий тока. При этом наибольшее давление испытывают частицы, расположенные в непосредственной близости от рабочего пуансона; в соответствии с приложенными усилиями возможно уменьшение пористости. Во второй стадии процесса происходит истечение прессуемого материала из канала пресс-формы. В сечении А–В, разделяющем части 5 и 6 пресс-формы, действует усилие P_2^n, создающее противодавление истечению пластически сжимаемой среды (рис. 3, *а*).

Усилие P_{AB} определяется условиями равновесия сил, действующих на сжимаемый материал в канале пресс-формы:

$$P_{AB} = P_2 + \pi\tau_{c2} D L_2, \qquad (1)$$

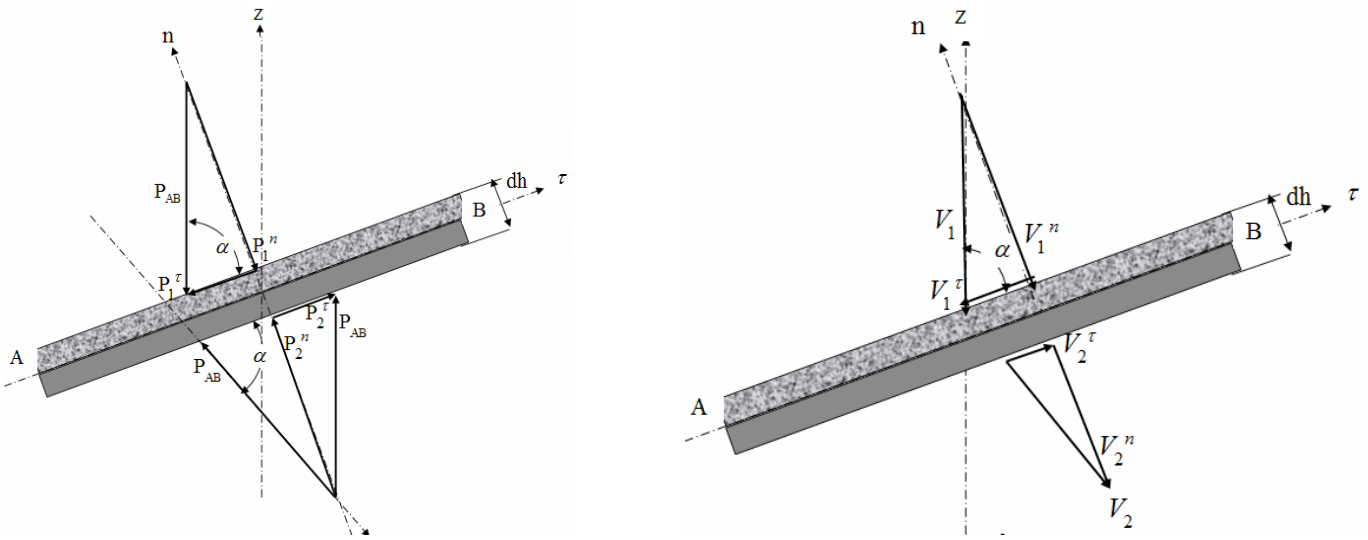
где P_2 – усилие, создающее противодавление; τ_{c2} – напряжение трения скольжения на поверхности пресс-формы; L_2 – длина пресс-остатка; D – диаметр канала.

Для определения силовых параметров второй стадии процесса РКУП применили уравнение баланса мощности:

$$P_1 V_1 - P_2 V_2 = $$

$$= \pi D(\tau_{c1} L_1 V_1 + \tau_{c2} L_2 V_2) + W\,|AB, \qquad (2)$$

где V_1, V_2 – скорости течения пластически сжимаемой массы из каналов I и II пресс-формы; $W\,|AB$ – диссипация мощности в слое интенсивной деформации (толщина слоя $\Delta h \to 0$).



а *б*

Рис. 3. Статически допустимая схема нагрузки на слой интенсивной деформации (*а*) и кинематически допустимая схема течения пластически сжимаемой среды в слое А–В (*б*)

Fig. 3. A statically permissible scheme of loading on a layer of severe deformation (*a*) and a kinematically permissible flow scheme of a plastically compressible medium in a layer A–B (*б*)

Физические уравнения представительного элемента объема пластически сжимаемой среды [28–30] имеют вид

$$\sigma_{ij} = \sigma + 2\frac{T(\vartheta)}{H}\left(\xi_{ij} - \frac{1}{3}\xi\delta_{ij}\right), \qquad (3)$$

где σ_{ij}, ξ_{ij} – компоненты тензора напряжений и тензора скорости деформации; σ – среднее нормальное напряжение; ξ – скорость объемной деформации; T – интенсивность напряжений сдвига; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; δ_{ij} – символ Кронекера.

Пределы текучести при сдвиге τ_s^* и изостатическом сжатии p_s^* в зависимости от относительной пористости ϑ деформируемой среды заданы соотношениями:

$$\tau_s^* = T = \tau_s(1 - \vartheta^{2/3});$$
$$p_s^* = -\sigma = -\frac{2}{\sqrt{3}}\tau_s \ln\vartheta, \qquad (4)$$

где τ_s – предел текучести на сдвиг частиц титана; ϑ – относительная пористость элемента объема титановой губки.

Зависимости $\tau_s^* / \tau_s = f_\tau(\vartheta)$ и $p_s^* / \tau_s = f_p(\vartheta)$ показаны на (рис. 4).

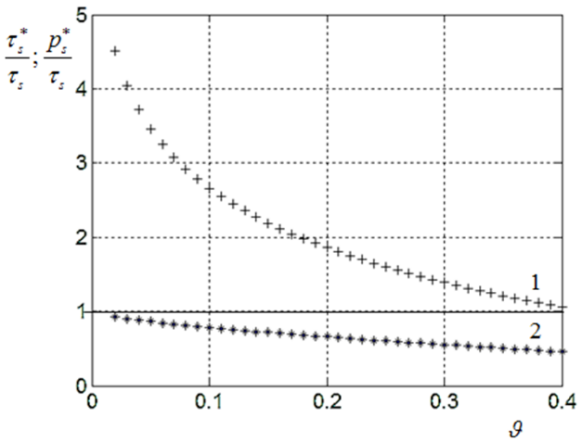


Рис. 4. Зависимость пределов текучести сжимаемой среды от пористости ϑ:

1 – при изостатическом сжатии $p_s^* / \tau_s = f_p(\vartheta)$;

2 – при сдвиге $\tau_s^* / \tau_s = f_\tau(\vartheta)$

Fig. 4. Dependence of the yield strength of the compressible medium on porosity ϑ:

1 – for isostatic compression $p_s^* / \tau_s = f_p(\vartheta)$;

2 – for shear $\tau_s^* / \tau_s = f_\tau(\vartheta)$

Рассмотрим стадию процесса РКУП, в которой осуществляется сжатие заготовки подобно сжатию пористой массы в закрытой пресс-форме. При этом используем результаты работы [31]. Для первого приближения полагаем, что внешним трением можно пренебречь; движение пуансона *2* задано; давление на пуансон опреде-

ляется из уравнения баланса мощностей (2); в начальный момент прессования пористость материала заготовки равна ϑ_b.

Краевые условия в цилиндрической системе координат (r, φ, z) имеют вид: $\sigma_{rz}|r = R = 0$, $R = D / 2$; $v_r|r = 0 = v_r|r = R = 0$, $v_z|z = 0 = 0$, $v_z|z = L_1 = V_1 = dl / dt$. Для данных условий кинематически допустимое поле скоростей $v_r = 0$, $v_z = V_1 z / L_1$; компоненты тензора скорости деформаций $\xi_{ij} = 0$, кроме $\xi_{zz} = -V_1 / L_1$; скорость изменения объема в части I канала пресс-формы $\xi = \xi_{zz}$. Степень деформации сдвига Λ и степень объемной деформации ε имеют вид

$$\Lambda = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{L_b}{L_1}\right), \quad \varepsilon = \ln\left(\frac{L_1}{L_b}\right). \qquad (5)$$

Значения относительной пористости ϑ_1 сжимаемой среды в части I канала пресс-формы является функцией перемещения dl рабочего пуансона:

$$\vartheta_1 = 1 - \frac{1 - \vartheta_b}{1 - dl / L_b}. \qquad (6)$$

Перемещение инструмента в первой стадии процесса РКУП возможно только при уменьшении объема пор. При этом увеличивается p_s^* и относительная плотность сжимаемой пористой массы.

Зависимость пористости ϑ от нагрузки $\bar{p} = p_z / \tau_s$ пластического течения сжимаемой среды представили следующим образом:

$$\vartheta = (1 + \bar{p}^{3/2})^{-1}. \qquad (7)$$

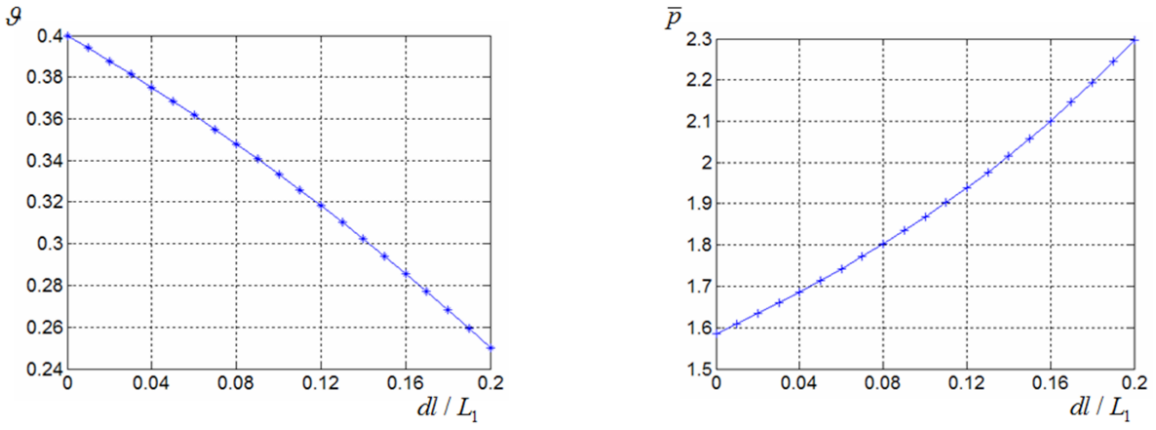
В результате решения уравнений (6) и (7) определили изменение пористости титановой губки и удельного давления в зависимости от перемещения пуансона (рис. 5).

Для вычисления бокового давления на пресс-форму использовали физические уравнения (3) и (4). Формула для расчета бокового давления имеет вид

$$\bar{p}_b = \frac{p_b}{\tau_s} = \frac{1}{\sqrt{3}}(-1 + \vartheta^{2/3} - 2\ln\vartheta). \qquad (8)$$

Результаты вычисления $\bar{p}$ (ϑ) и $\bar{p}_b$ (ϑ) показаны на рис. 6.

Рассмотрим стадию процесса РКУП, в которой выдавливаемая заготовка в канале пресс-формы перемещается как жестко-пластическое тело. При этом деформация изменения формы и объема пластически сжимаемой среды локализуется в слое интенсивной деформации (слой A–B). Толщина слоя $\Delta h \to 0$; материал слоя испытывает однородное деформированное состояние, которое в локальной системе координат (n, τ, ς) можно представить линейными функциями.



а *б*

Рис. 5. Изменение пористости ϑ сжимаемой среды (*а*) и удельного давления $\bar{p}$ (*б*) на рабочий пуансон при перемещении dl / L_b

Fig. 5. Change in the porosity ϑ of the compressible medium (*a*) and the specific pressure $\bar{p}$ (*б*) on the working punch displacement dl / L_b

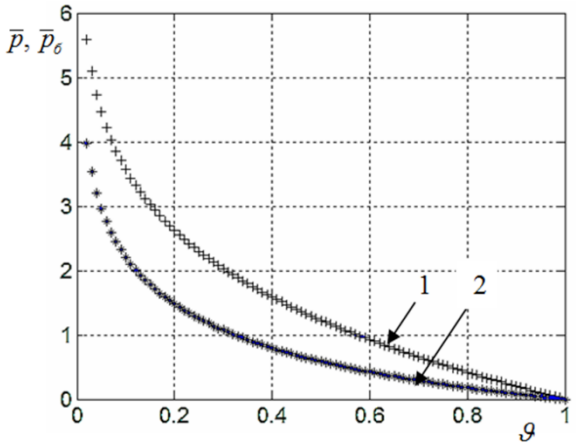


Рис. 6. Зависимость нагрузки пластического течения $\bar{p}$ и бокового давления $\bar{p}_b$ на пресс-форму от пористости ϑ уплотняемой среды:
1 – $\bar{p}(\vartheta)$; *2* – $\bar{p}_b(\vartheta)$

Fig. 6. Dependence of the plastic flow load $\bar{p}$ and side pressure $\bar{p}_b$ on the a pressing tool on the porosity ϑ of the compacted medium:
1 – $\bar{p}(\vartheta)$; *2* – $\bar{p}_b(\vartheta)$

В соответствии с кинематически допустимой схемой течения пластически сжимаемой среды для слоя А–В, учитывая граничные условия, поле скоростей представили в виде

$$[V^n] = |V_1 - V_2| \sin\alpha,$$
$$[V^\tau] = |V_1 + V_2| \cos\alpha, \quad [V^\varsigma] = 0, \tag{9}$$

где $[V^i]$ – скачок вектора скорости перемещения материальных частиц через слой интенсивной деформации.

Скорости V_1^n, V_2^n (рис. 3, *б*) связаны условием сохранения массы:

$$V_1^n \rho_1 = V_2^n \rho_2;$$
$$V_2 = V_1 \frac{1-\vartheta_1}{1-\vartheta_2}, \tag{10}$$

где ρ_1, ρ_2 – плотность прессуемого материала в частях II и I канала пресс-формы; ϑ_1, ϑ_2 – пористость сжимаемого материала.

В случае пластически сжимаемой среды в систему уравнений также входит условие неразрывности, которое в [32] проинтегрировано вдоль траектории движения представительного элемента объема. Из условия сохранения массы (10) следует, что пересечение пластически сжимаемой средой слоя А–В приводит к изменению относительной пористости среды. С учетом условия сохранения массы и условия неразрывности определена плотность выдавливаемого материала из канала пресс-формы:

$$\rho_2 = \rho_1 \exp\frac{2|V_1 - V_2|}{|V_1 + V_2|}. \tag{11}$$

Полагая, что относительная плотность ρ уплотняемого материала известна в результате анализа первой стадии процесса РКУП, вычислили диссипацию мощности слоя интенсивной деформации:

$$W|AB = \lim_{dh\to 0}(TH + \sigma\xi)S_{AB}dh. \tag{12}$$

Интенсивность скоростей деформации сдвига H и скорость деформации изменения объема ξ слоя А–В определены следующими соотношениями:

$$H = \frac{1}{dh}\left([V^\tau]^2 + \frac{4}{3}[V^n]^2\right)^{1/2}; \quad \xi = \frac{[V^n]}{dh}.$$

Для определения энергосиловых параметров второй стадии РКУП применили уравнение баланса мощностей (2), в котором величина $W|AB$ вычисляется с использованием соотношения (12). Делением диссипативных функций уравнения баланса мощностей на величины $\tau_s, V_1, \pi D^2/4$ уравнение (2) привели к безразмерной форме:

$$\bar{p}_1 = \bar{p}_2\chi + 4\left(k_1\frac{L_1}{D} + k_2\frac{L_2}{D}\chi\right) + \left(\sqrt{\frac{4}{3} + \left(\frac{1+\chi}{1-\chi}\cot(\alpha)\right)^2} - 2 \quad \ln(1-\rho) \quad (1-\chi)\right.$$
$$\left. - \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{\ln(1-\rho)}{1-(1-\rho)^{2/3}}\right)(1-\chi); \tag{13}$$
$$k_1 = \frac{\tau_{c1}}{\tau_s^*}, \; k_2 = \frac{\tau_{c2}}{\tau_c^*}; \; \chi = \frac{V_2}{V_1}.$$

Здесь k_1, k_2 – коэффициенты в законе трения Зибеля; $\chi = \rho_1/\rho_2$ – прарметр, характеризующий уплотнение сжимаемой среды в слое А–В.

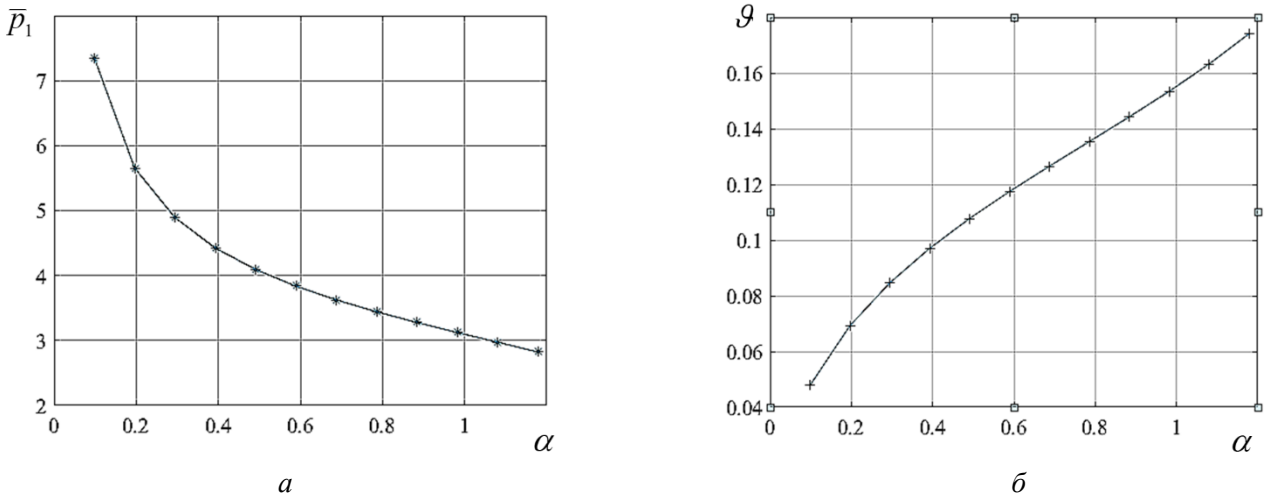
Уравнение (13) решается методом последовательных приближений. При этом предполагается, что плотность выдавливаемой заготовки рассчитана для предшествующей стадии исследуемого процесса. Система уравнений (1–13) позволяет от цикла к циклу однозначно прогнозировать комплекс технологических параметров, которые необходимы для анализа и совершенствования процесса РКУП.

Осуществили серию вычислительных экспериментов, целью которых было определить влияние угла α на давление выдавливания $\bar{p}_1$ и относительную плотность спрессованной заготовки.

Вычисления выполнили для следующих исходных данных: $\vartheta_b = 0,4$; $L_1 / D = 4$, $L_2 / D = 2$; $k_1 = k_2 = 0,2$; $\chi = 0,8$; $\pi / 16 \le \alpha \le \pi / 2$. Значения плотности ρ и пористости ϑ пластически сжимаемой заготовки при варьировании удельных давлений $\bar{p}_1$ на рабочий пуансон определены с использованием формул (4) и (6). В результате определили зависимость давления прессования $\bar{p}_1(\alpha)$ и пористости $\vartheta(\alpha)$ заготовки от угла α (рис. 7).

Численное моделирование процесса РКУП требует применения модели пластического течения пористого материала, включенной в программное обеспечение современных САПР. Результаты моделирования существенно зависят как от выбора самой модели материала, так и от методов ее идентификации. В настоящей работе для описания реологического поведения пористого материала использована модель пластичности пористого металла Гурсона (Gurson) [33]. Особенностью этой модели, реализованной в программном комплексе конечно-элементного анализа Simulia / Abaqus, является возможность описания процессов как уплотнения, так и разуплотнения порошковых материалов в широком диапазоне изменения напряженно-деформированного состояния. В данном случае такая постановка задачи позволяет определить области деформируемой пористой заготовки с высоким уровнем растягивающих напряжений в процессе РКУП, а следовательно, потенциально опасные для образования поверхностных трещин и разрушения материала. Ниже показано применение методики идентификации модели пластического течения пористой заготовки из титановой губки.

Имитационное моделирование процесса РКУП выполнили методом конечных элементов. Решение задачи осуществлялось в объемной постановке, но использовалась половина сечения в силу симметрии. Для моделирования применялся расчетный модуль Explicit CAE-системы Abaqus. Использовалась модель пластичности пористого металла, основанная на теории пластичности пористого металла Гурсона (Gurson). Начальная относительная плотность составляла 0,6, инструмент задавался как абсолютно жесткий. Контактное взаимодействие между заготовкой и инструментом описывалось условием трения Амантона – Кулона, коэффициент трения $\mu = 0,1$. Принято допущение, что на поверхно-



а *б*

Рис. 7. Зависимости давления $\bar{p}_1(\alpha)$ прессования и пористости $\vartheta(\alpha)$ заготовки от угла α

Fig. 7. The dependence of the pressing pressure $\bar{p}_1(\alpha)$ and porosity of the workpiece $\vartheta(\alpha)$ on the angle α

сти контакта заготовки и инструмента касательные напряжения ограничены $\tau_S = 30$ МПа.

Моделирование с использованием метода конечных элементов позволяет оценивать множество параметров. При решении задачи в данном случае ограничились анализом распределения интенсивности напряжений σ_i и относительной пористости ϑ, которые представлены на рис. 8 и 9.

На рис. 8 показано распределение интенсивности напряжений в тонком слое, расположенном в окрестности сечения и разделяющем входную I и выходную II части канала пресс-формы. Видно, что наибольший уровень напряжений возникает в процессе равноканального углового прессования при $\alpha = 45°$. Соотношение максимальных значений интенсивности напряжений между схемами РКУП с углами 45 и 60° составляет 1,57.

Распределение относительной плотности по сечению наиболее равномерно в случае, когда угол $\alpha = 45°$ (рис. 9, *а*). При $\alpha = 50°$ пористость присутствует только в концевой части заготовки, даже несмотря на противодавление. В остальных случаях происходит разуплотнение в контактной зоне заготовки с поверхностью канала пресс-формы. При этом увеличение значения относительной пористости ϑ не превышает 0,05. Присутствует также значительная неоднородность в концевой области заготовок.

График изменения давления на рабочий пуансон приведен на рис. 10.

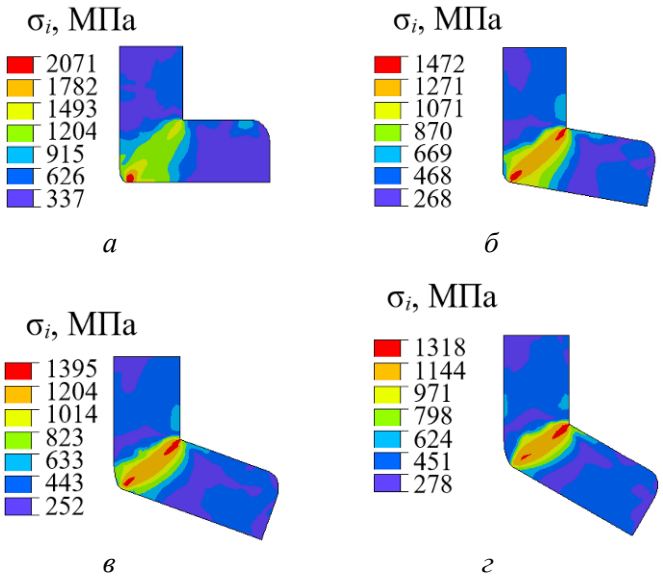


Рис. 8. Распределение интенсивности напряжений σ_i на установившейся стадии процесса:

а – $\alpha = 45°$; *б* – $\alpha = 50°$; *в* – $\alpha = 55°$; *г* – $\alpha = 60°$

Fig. 8. The distribution of the yield stress σ_i at the steady stage of the process:

а – $\alpha = 45°$; *б* – $\alpha = 50°$; *в* – $\alpha = 55°$; *г* – $\alpha = 60°$

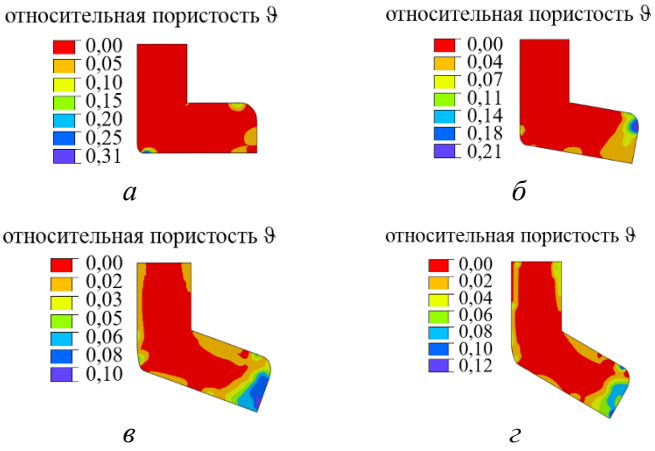


Рис. 9. Распределение относительной пористости ϑ на установившейся стадии процесса:

а – $\alpha = 45°$; *б* – $\alpha = 50°$; *в* – $\alpha = 55°$; *г* – $\alpha = 60°$

Fig. 9. Distribution of relative porosity ϑ at the steady stage of the process:

а – $\alpha = 45°$; *б* – $\alpha = 50°$; *в* – $\alpha = 55°$; *г* – $\alpha = 60°$

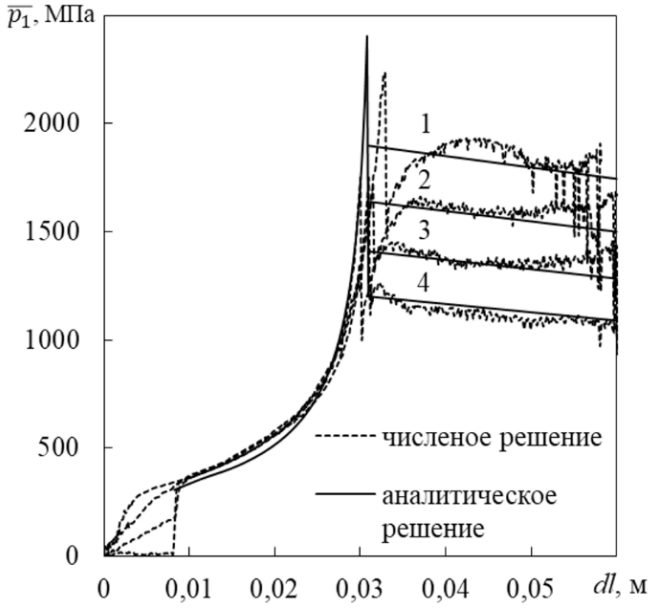


Рис. 10. График изменения давления на рабочий пуансон $\bar{p}_1$ при перемещении dl:

1 – $\alpha = 45°$; *2* – $\alpha = 50°$; *3* – $\alpha = 55°$; *4* – $\alpha = 60°$

Fig. 10. The dependence of the pressing force $\bar{p}_1$ on the movement dl of the punch:

1 – $\alpha = 45°$; *2* – $\alpha = 50°$; *3* – $\alpha = 55°$; *4* – $\alpha = 60°$

Аналитические вычисления выполнены в соответствии с результатами математической модели, а результаты численного решения были получены при компьютерном моделировании с использованием метода конечных элементов. На рис. 10 видна удовлетворительная сходимость результатов решений. График показывает изменение давления прессования на основных стадиях процесса. При переходе от начальной стадии процесса РКУП к завершающей давление прессования принимает максимальное значение [34, 35]. При увеличении угла α максимальное значение давления на рабочий пуансон уменьшается. Рациональные технологические параметры прессования пористых заготовок должны обеспечивать максимально допустимые давления на деформирующий инструмент. Согласно этому условию в каждом конкретном процессе РКУП определяется оптимальное значение угла 2α.

Выводы

Для оптимизации технологических процессов изготовления заготовок и изделий из порошковых и пористых материалов разработана достаточно надежная и простая для практического использования математическая модель процесса полунепрерывного равноканального углового прессования пластически сжимаемой среды. В качестве модельного материала исходных заготовок для реализации рассматриваемого процесса приняты свойства материала пористых брикетов, изготовленных компактированием титановой губки в закрытой пресс-форме. Рассмотрены основные стадии РКУП: начальная стадия процесса, в которой пористый деформируемый материал испытывает сжатие в закрытой пресс-форме; стадия, характеризующаяся интенсивной пластической деформацией, локализованной при изменении угла канала пресс-формы; завершающая стадия, в которой деформируемый материал сжат до практически компактного состояния и истекает из канала пресс-формы как сплошное тело. Математическая модель позволяет определить энергосиловые параметры процесса РКУП. Помимо аналитического решения приведено конечно-элементное моделирование РКУП пористого материала для более детального прогнозирования пористости по сечению заготовки. Показано удовлетворительное соответствие результатов расчета энергосиловых параметров процесса. Возможность описания процессов как уплотнения, так и разуплотнения материалов на макроуровне в широком диапазоне объемной пластической деформации позволит более точно определять области деформируемой пористой заготовки, подверженные высоким растягивающим напряжениям в процессе РКУП и являющиеся потенциально опасными с точки зрения образования поверхностных трещин и разрушения материала.

Список литературы

1. Experimental parameters influencing grain refinement and microstructural evolution during high-pressure torsion / A.P. Zhilyaev, G.V. Nurislamova, B.K. Kim, M.D. Baro, J.A. Szpunar, T.G. Langdon // Acta Materialia. – 2003. – Vol. 51, iss. 3. – P. 753–765. – DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00466-4.

2. Novel ultra-high straining process for bulk materials – development of the accumulative roll-bonding (ARB) process / Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai // Acta Materialia. – 1999. – Vol. 47, iss. 2. – P. 579–583. – DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00365-6.

3. Production of submicrocrystalline structure in large-scale Ti–6Al–4V billet by warm severe deformation processing / S.V. Zherebtsov, G.A. Salishchev, R.M. Galeyeva, O.R. Valiakhmetova, S.Yu. Mironova, S.L. Semiatin // Scripta Materialia. – 2004. – Vol. 51. – P. 1147–1151. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.08.018.

4. Work hardening and microstructure of AlMg5 after severe plastic deformation by cyclic extrusion and compression / M. Richert, H.P. Stuwe, M.J. Zehetbauer, J. Richert, R. Pippan, Ch. Motz, E. Schafler // Materials Science and Engineering: A. – 2003. – Vol. 355, iss. 1–2. – P. 180–185. – DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00046-7.

5. *Mani B., Jahedi M., Paydar M.H.* Consolidation of commercial pure aluminum powder by torsional-equal channel angular pressing (T-ECAP) at room temperature // Powder Technology. – 2012. – Vol. 219. – P. 1–8. – DOI: 10.1016/j.powtec.2011.11.034.

6. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation / R.Z. Valiev, Yu. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zehetbauer, Y.T. Zhu // JOM. – 2006. – Vol. 58. – P. 33–39. – DOI: 10.1007/s11837-006-0213-7.

7. *Segal V.* Review: modes and processes of severe plastic deformation (SPD) // Materials. – 2018. – Vol. 11 (7). – P. 1175. – DOI: 10.3390/ma11071175.

8. *William G., Voorkes J.* Conform and Linex – continuous aluminium extrusion machines // Light Metal Age. – 1978. – Vol. 36, iss. 1–2. – P. 18–20.

9. *Thomas B.M., Derguti F., Jackson M.* Continuous extrusion of a commercially pure titanium powder via the Conform process // Materials Science and Technology. – 2017. – Vol. 33, iss. 7. – P. 899–903. – DOI: 10.1080/02670836.2016.1245256.

10. *Segal V.M.* Mechanics of continuous equal-channel angular extrusion // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 210. – P. 542–549. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.11.001.

11. *Lapovok R., Tomus D., Bettles C.* Shear deformation with imposed hydrostatic pressure for enhanced compaction of powder // Scripta Materialia. – 2008. – Vol. 58, iss. 10. – P. 898–901. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.01.010.

12. Ultrafine-grained porous titanium and porous titanium/magnesium composites fabricated by space holder-enabled severe plastic deformation / Y. Qi, K.G. Contreras, H.D. Jung, H.E. Kim, R. Lapovok, Y. Estrin // Materials Science and Engineering: C. – 2016. – Vol. 59. – P. 754–765. – DOI: 10.1016/j.msec.2015.10.070.

13. Microstructural characteristics and superplastic-like behavior in aluminum powder alloy consolidated by equal-channel angular pressing / K. Matsuki, T. Aida, T. Takeuchi, J. Kusui, K. Yokoe // Acta Materialia. – 2000. – Vol. 48, iss. 10. – P. 2625–2632. – DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00061-6.

14. *Xia K., Wu X.* Back pressure equal channel angular consolidation of pure Al particles // Scripta Materialia. – 2005. – Vol. 53, iss. 11. – P. 1225–1229. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.08.012.

15. Cold compaction study of Armstrong Process® Ti–6Al–4V powders / W. Chen, Y. Yamamoto, W.H. Peter, S.B. Gorti, A.S. Sabau, M.B. Clark, S.D. Nunn, J.O. Kiggans, C.A. Blue, J.C. Williams, B. Fuller, K. Akhtar // Powder Technology. – 2011. – Vol. 212, iss. 2. – P. 194–199. – DOI: 10.1016/j.powtec.2011.08.007.

16. *Crowley G.* How to extract low-cost titanium // Advanced Materials and Processes. – 2003. – Vol. 161, iss. 11. – P. 25–27.

17. *Chen G.Z., Fray D.J., Farthing T.W.* Direct electrochemical reduction of titanium dioxide to titanium in molten calcium chloride // Nature. – 2000. – Vol. 407. – P. 361–364. – DOI: 10.1038/35030069.

18. *Donaldson A., Cordes R.A.* Rapid plasma quenching for the production of ultrafine metal and ceramic powders // JOM. – 2005. – Vol. 57, iss. 4. – P. 58–63. – DOI: 10.1007/s11837-005-0083-4.

19. Obtaining of titanium powder from titanium sponge by self-propagating high-temperature synthesis hydration and dehydration / V.I. Ratnikov, V.K. Prokudina, A.F. Belikova, N.V. Sachkova // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2010. – Vol. 51, iss. 4. – P. 352–358. – DOI: 10.3103/S1067821210040176.

20. *Bukhvalov A.B., Gorshkov M.M., Litvinov B.V.* Effect of hydrogenation and hot-cold rolling of compact from titanium sponge on its structure, strain hardening, and fracture behavior // Metal Science and Heat Treatment. – 2004. – Vol. 46, iss. 11–12. – P. 527–534. – DOI: 10.1007/s11041-005-0013-7.

21 Porous material based on spongy titanium granules: structure, mechanical properties, and osseointegration / A.P. Rubshtein, I.Sh. Trakhtenberg, E.B. Makarova, E.B. Triphonova, D.G. Bliznets, L.I. Yakovenkova, A.B. Vladimirov // Materials Science and Engineering: C. – 2014. – Vol. 35. – P. 363–369. – DOI: 10.1016/j.msec.2013.11.020.

22. Analysis of compressibility behavior and development of a plastic yield model for uniaxial die compaction of sponge titanium powder / A. Hadadzadeh, M.A. Whitney, M.A. Wells, S.F. Corbin // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 243. – P. 92–99. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.12.004.

23. Влияние температуры на компактируемость брикетов из титановой губки, легированной водородом / А.В. Нестеренко, В.И. Новожонов, А.Г. Залазинский, А.В. Скрипов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 52–57. – DOI: 10.17073/0021-3438-2015-2-52-57.

24. *Нестеренко А.В., Новожонов В.И., Вичужанин Д.И.* Влияние деформационной обработки на свойства и структуру полуфабрикатов, полученных твердофазной консолидацией титановой губки // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 42–47. – DOI: 10.17073/0021-3438-2015-4-42-47.

25. *Нестеренко А.В., Новожонов В.И., Залазинский А.Г.* Влияние деформационной обработки на свойства и структуру титана, полученного пластической деформацией титановой губки легированной водородом // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Iss. 3. – P. 98–108. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.098-108.

26. Патент № 2686436 Российская Федерацияна: № 2018132622: заявл. 12.09.2018; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 12. Пресс-форма для двухстороннего прессования порошка / Березин И.М., Залазинский А.Г.

27. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.

28. *Колмогоров В.Л.* Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.

29. *Друянов Б.А.* Прикладная теория пластичности пористых тел. – М.: Машиностроение, 1989. – 165 с.

30. *Залазинский А.Г., Колмыков В.Л., Соколов М.В.* О физических уравнениях пористого материала // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1997. – № 4. – С. 39–43.

31. *Залазинский А.Г.* Пластическое деформирование структурно-неоднородных материалов. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2000. – 492 с.

32. *Залазинский А.Г., Поляков А.П.* Построение разрывного решения для процесса выдавливания пластически сжимаемого тела // Известия вузов. Машиностроение. – 2001. – № 4. – С. 43–53.

33. *Gurson A.L.* Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Pt. I. Yield criteria and flow rules for porous ductile materials // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1977. – Vol. 99. – P. 2–15.

34. Effect of acute tool-angles on equal channel angular extrusion/pressing / A.V. Nagasekhar, Y. Tick-Hon, S. Li, H.P. Seow // Materials Science and Engineering: A. – 2005. – Vol. 410–411. – P. 269–272. – DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.043.

35. Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion / S. Li, M.A.M. Bourke, I.J. Beyerlein, D.J. Alexander, B. Clausen // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Vol. 382, iss. 1–2. – P. 217–236. – DOI: 10.1016/j.msea.2004.04.067.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

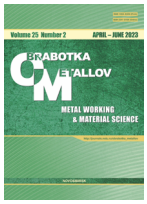
© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 2 pp. 17–31
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-17-31

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Analytical model of equal-channel angular pressing of titanium sponge

Ivan Berezin [1, 2 a,*], ***Alexander Zalazinsky*** [3, b], ***Denis Kryuchkov*** [3, c*]

[1] Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation
[2] GUIDE SYSTEMS LLC, 18b Rodonitova str., Ekaterinburg, 620089, Russian Federation
[3] Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Science, 34 Komsomolskaya str., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-8674-3352, i.m.berezin@urfu.ru, [b] https://orcid.org/0000-0001-8352-5475, zalaz@list.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0001-8585-3544, kru4koff@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 28 February 2023
Revised: 29 March 2023
Accepted: 28 April 2023
Available online: 15 June 2023

Keywords:
Model
Equal-channel angular pressing
Titanium sponge
FEM

Funding
The work was financed by the State budget. A theme No. 0391-2019-0005 "Development of scientific bases of designing of optimum production engineering plastic forming of metal materials with the secured level of a continuity and physicomechanical properties".

Acknowledgements
Researches were conducted at core facility of NSTU "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. The use of equal-channel angular pressing (*ECAP*) of metal powder makes it possible to obtain practically non-porous blanks with high hardness, with a high level of accumulated deformation and with the formation of an ultra-fine-grained structure. A relevant issue for the study of the semi-continuous *ECAP* process remains a reliable assessment of the energy-power parameters of the process and the prediction of the porosity of compressed materials. This, in turn, is due to the need to develop sufficiently accurate, reliable and simple mathematical models for practical application. **The purpose of the work** is to develop an analytical model of the process of equal-channel angular pressing of porous material. Powdered screening of spongy titanium of the *TG-100* brand was selected as a model of the material for the study. The object of the study is the process of semi-continuous equal-channel angular pressing of axisymmetric porous briquette of titanium sponge in the channel of the mold. It is assumed that the *ECAP* uses a punch to create back pressure. For the solution, a process scheme, a statically permissible load scheme on a layer of intense deformation and a kinematically permissible flow scheme of a plastically compressible medium in a layer **are determined**. A system of equations is constructed in accordance with the accepted schemes. The equation power balance is applied. The analytical equation is solved by the method of successive approximations. Finite element simulation of the porous titanium *ECAP* process was carried out at the angles of intersection of the mold channels at 45°, 50°, 55° and 60°. **Results and Discussion.** The porosity of the blank is determined at different stages of the *ECAP* process. A diagram of the change in pressure on the punch using the analytical solution and finite element simulation is obtained. It is revealed that the results of the analytical solution are consistent with the data of the finite element simulation. The highest stress level occurs in the process of equal-channel angular pressing at $\alpha = 45°$, however, the distribution of relative density over the cross section is most uniform. The maximum value of the pressure on the working punch decreases with an increase in the angle α. Rational technological parameters of pressing porous blanks should provide the maximum permissible pressure on the deforming tool. From this condition, in each specific *ECAP* process, it is possible to determine the optimal angle value from the analytical solution.

For citation: Berezin I.M., Zalazinsky A.G., Kryuchkov D.I. Analytical model of equal-channel angular pressing of titanium sponge. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 17–31. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-17-31. (In Russian).

References

1. Zhilyaev A.P., Nurislamova G.V., Kim B.K., Baro M.D., Szpunar J.A., Langdon T.G. Experimental parameters influencing grain refinement and microstructural evolution during high-pressure torsion. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, iss. 3, pp. 753–765. DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00466-4.

*** Corresponding author**
Kryuchkov Denis I., Ph.D. (Engineering), Researcher
Institute of Engineering Science,
Ural Branch of the Russian Academy of Science,
34 Komsomolskaya str.,
620049, Ekaterinburg, Russian Federation
Tel.: 8 (343) 374-50-51, **e-mail:** kru4koff@bk.ru

2. Saito Y., Utsunomiya H., Tsuji N., Sakai T. Novel ultra-high straining process for bulk materials – development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. *Acta Materialia*, 1999, vol. 47, iss. 2, pp. 579–583. DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00365-6.

3. Zherebtsov S.V., Salishchev G.A., Galeyeva R.M., Valiakhmetova O.R., Mironova S.Yu., Semiatin S.L. Production of submicrocrystalline structure in large-scale Ti–6Al–4V billet by warm severe deformation processing. *Scripta Materialia*, 2004, vol. 51, pp. 1147–1151. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.08.018.

4. Richert M., Stuwe H.P., Zehetbauer M.J., Richert J., Pippan R., Motz Ch., Schafler E. Work hardening and microstructure of AlMg5 after severe plastic deformation by cyclic extrusion and compression. *Materials Science and Engineering: A.*, 2003, vol. 355, iss. 1–2, pp. 180–185. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00046-7.

5. Mani B., Jahedi M., Paydar M.H. Consolidation of commercial pure aluminum powder by torsional-equal channel angular pressing (T-ECAP) at room temperature. *Powder Technology*, 2012, vol. 219, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.11.034.

6. Valiev R.Z., Estrin Yu., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J., Zhu Y.T. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *JOM*, 2006, vol. 58, pp. 33–39. DOI: 10.1007/s11837-006-0213-7.

7. Segal V. Review: modes and processes of severe plastic deformation (SPD). *Materials*, 2018, vol. 11 (7), p. 1175. DOI: 10.3390/ma11071175.

8. William G., Voorkes J. Conform and Linex – continuous aluminium extrusion machines. *Light Metal Age*, 1978, vol. 36, iss. 1–2, pp. 18–20.

9. Thomas B.M., Derguti F., Jackson M. Continuous extrusion of a commercially pure titanium powder via the Conform process. *Materials Science and Technology*, 2017, vol. 33, iss. 7, pp. 899–903. DOI: 10.1080/02670836.2016.1245256.

10. Segal V.M. Mechanics of continuous equal-channel angular extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, pp. 542–549. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.11.001.

11. Lapovok R., Tomus D., Bettles C. Shear deformation with imposed hydrostatic pressure for enhanced compaction of powder. *Scripta Materialia*, 2008, vol. 58, iss. 10, pp. 898–901. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.01.010.

12. Qi Y., Contreras K.G., Jung H.D., Kim H.E., Lapovok R., Estrin Y. Ultrafine-grained porous titanium and porous titanium/magnesium composites fabricated by space holder-enabled severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: C*, 2016, vol. 59, pp. 754–765. DOI: 10.1016/j.msec.2015.10.070.

13. Matsuki K., Aida T., Takeuchi T., Kusui J., Yokoe K. Microstructural characteristics and superplastic-like behavior in aluminum powder alloy consolidated by equal-channel angular pressing. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 10, pp. 2625–2632. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00061-6.

14. Xia K., Wu X. Back pressure equal channel angular consolidation of pure Al particles. *Scripta Materialia*, 2005, vol. 53, iss. 11, pp. 1225–1229. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.08.012.

15. Chen W., Yamamoto Y., Peter W.H., Gorti S.B., Sabau A.S., Clark M.B., Nunn S.D., Kiggans J.O., Blue C.A., Williams J.C., Fuller B., Akhtar K. Cold compaction study of Armstrong Process® Ti–6Al–4V powders. *Powder Technology*, 2011, vol. 212, iss. 2, pp. 194–199. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.08.007.

16. Crowley G. How to extract low-cost titanium. *Advanced Materials and Processes*, 2003, vol. 161, iss. 11, pp. 25–27.

17. Chen G.Z., Fray D.J., Farthing T.W. Direct electrochemical reduction of titanium dioxide to titanium in molten calcium chloride. *Nature*, 2000, vol. 407, pp. 361–364. DOI: 10.1038/35030069.

18. Donaldson A., Cordes R.A. Rapid plasma quenching for the production of ultrafine metal and ceramic powders. *JOM*, 2005, vol. 57, iss. 4, pp. 58–63. DOI: 10.1007/s11837-005-0083-4.

19. Ratnikov V.I., Prokudina V.K., Belikova A.F., Sachkova N.V. Obtaining of titanium powder from titanium sponge by self-propagating high-temperature synthesis hydration and dehydration. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2010, vol. 51, iss. 4, pp. 352–358. DOI: 10.3103/S1067821210040176.

20. Bukhvalov A.B., Gorshkov M.M., Litvinov B.V. Effect of hydrogenation and hot-cold rolling of compact from titanium sponge on its structure, strain hardening, and fracture behavior. *Metal Science and Heat Treatment*, 2004, vol. 46, iss. 11–12, pp. 527–534. DOI: 10.1007/s11041-005-0013-7.

21. Rubshtein A.P., Trakhtenberg I.Sh., Makarova E.B., Triphonova E.B., Bliznets D.G., Yakovenkova L.I., Vladimirov A.B. Porous material based on spongy titanium granules: structure, mechanical properties, and osseointegration. *Materials Science and Engineering: C*, 2014, vol. 35, pp. 363–369. DOI: 10.1016/j.msec.2013.11.020.

22. Hadadzadeh A., Whitney M.A., Wells M.A., Corbin S.F. Analysis of compressibility behavior and development of a plastic yield model for uniaxial die compaction of sponge titanium powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 243, pp. 92–99. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.12.004.

23. Nesterenko A.V., Novozhonov V.I., Zalazinskii A.G., Skripov A.V. Vliyanie temperatury na kompaktiruemost' briketov iz titanovoi gubki, legirovannoi vodorodom [Influence of temperature on compactibility of briquettes of titanium sponge alloyed with hydrogen]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*, 2015, no. 2, pp. 52–57. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-2-52-57.

24. Nesterenko A.V., Novozhonov V.I., Vichuzhanin D.I. Vliyanie deformatsionnoi obrabotki na svoistva i strukturu polufabrikatov, poluchennykh tverdofaznoi konsolidatsiei titanovoi gubki [Influence of deformation treatment on the properties and structure of semi-finished products by solid-phase consolidation of titanium sponge]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*, 2015, no. 4, pp. 42–47. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-4-42-47.

25. Nesterenko A.V., Novozhonov V.I., Zalazinsky A.G. Effect of deformation processing on the properties and structure of titanium obtained by plastic deformation of hydrogen-alloyed titanium sponge. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, iss. 3, pp. 98–108. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.098-108. (In Russian).

26. Berezin I.M., Zalazinskij A.G. *Press-forma dlya dvukhstoronnego pressovaniya poroshka* [Mold for double-sided pressing of powder]. Patent RF, no. 2686436, 2019.

27. Mitin B.S., ed. *Poroshkovaya metallurgiya i napylennye pokrytiya* [Powder metallurgy and sprayed coatings]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 792 p.

28. Kolmogorov V.L. *Napryazheniya. Deformatsii. Razrushenie* [Stresses. Deformations. Destruction]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 229 p.

29. Druyanov B.A. *Prikladnaya teoriya plastichnosti poristykh tel* [Applied theory of plasticity of porous bodies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 165 p.

30. Zalazinsky A.G., Kolmykov V.L., Sokolov M.V. O fizicheskikh uravneniyakh poristogo materiala [On the physical equations of a porous material]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*, 1997, no. 4, pp. 39–43.

31. Zalazinsky A.G. *Plasticheskoe deformirovanie strukturno-neodnorodnykh materialov* [Plastic deformation of structurally inhomogeneous materials]. Yekaterinburg, IES UB RAS Publ., 2000. 492 p.

32. Zalazinsky A.G., Polyakov A.P. Postroenie razryvnogo resheniya dlya protsessa vydavlivaniya plasticheski szhimaemogo tela [Construction of a discontinuous solution for the process of extrusion of a plastically compressible body]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2001, no. 4, pp. 43–53.

33. Gurson A.L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Pt. I. Yield criteria and flow rules for porous ductile materials. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1977, vol. 99, pp. 2–15.

34. Nagasekhar A.V., Tick-Hon Y., Li S., Seow H.P. Effect of acute tool-angles on equal channel angular extrusion/pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 410–411, pp. 269–272. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.043.

35. Li S., Bourke M.A.M., Beyerlein I.J., Alexander D.J., Clausen B. Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 382, iss. 1–2, pp. 217–236. DOI: 10.1016/j.msea.2004.04.067.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).