

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ПРЕССОВАНИИ НЕКОМПАКТНОГО АЛЮМИНИЕВОГО МАТЕРИАЛА

© 2015 г. А.В. Аборкин, А.И. Елкин, Д.М. Бабин

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ)

Статья поступила в редакцию 18.03.14 г., доработана 21.08.14 г., подписана в печать 18.08.15 г.

Проведено исследование процесса непрерывного прессования (метод «Конформ») некомпактного алюминиевого материала системы Al–Mg. Получены экспериментальные данные об изменении температуры и энергосиловых параметров процесса. Выполнен анализ изменения температуры и гидростатического давления в зоне деформационной обработки, в ходе которого выявлено 7 зон, качественно характеризующих протекание процесса прессования некомпактного материала. Отмечена существенная неоднородность величины гидростатического давления в очаге деформации, обуславливающая неоднородность свойств получаемых заготовок.

Ключевые слова: непрерывное прессование металлов, моделирование, некомпактные материалы, температура, гидростатическое давление.

Аборкин А.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ВлГУ (600000, г. Владимир, ул. Горького, 87). E-mail: aborkin@vlsu.ru.

Елкин А.И. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: elkin@vlsu.ru.

Бабин Д.М. – ассистент колледжа Инновационных технологий и предпринимательства ВлГУ. E-mail: necros-m2@yandex.ru.

Для цитирования: Аборкин А.В., Елкин А.И., Бабин Д.М. Особенности изменения энергосиловых параметров, температуры и гидростатического давления при непрерывном прессовании некомпактного алюминиевого материала // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2015. No. 6. С. 23–29. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-6-23-29.

Aborkin A.V., Elkin A.I., Babin D.M.

Features of the variation of energy-power parameters, temperature, and hydrostatic pressure under continuous extrusion of a noncompact aluminum material

Continuous extrusion (the Conform method) of a noncompact aluminum material of the Al–Mg system is investigated. The experimental data on the variation in temperature and energy-power process parameters are found. The analysis of the variation in temperature and hydrostatic pressure in the zone of the deformation treatment is implemented. Seven zones, which qualitatively characterize the compaction of a noncompact material, are revealed during this analysis. An essential nonuniformity of the hydrostatic pressure in the deformation region, which conditions the inhomogeneity of the properties of prepared billets, is observed.

Keywords: continuous extrusion of metals, modeling, noncompact materials, temperature, hydrostatic pressure.

Aborkin A.V. – Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Department of Mechanical Engineering Technology, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VISU) (600000, Russia, Vladimir, Gorkogo str., 87). E-mail: aborkin@vlsu.ru.

Elkin A.I. – Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Department of Mechanical Engineering Technology, VISU. E-mail: elkin@vlsu.ru.

Babin D.M. – Assistant College of Innovative Technology and Business of VISU. E-mail: necros-m2@yandex.ru.

Citation: *Aborkin A.V., Elkin A.I., Babin D.M.* Osobennosti izmeneniya jenergosilovyh parametrov, temperatury i gidrostaticheskogo davleniya pri nepreryvnom pressovanii nekompaktnogo aljuminievoego materiala. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya.* 2015. No. 6. P. 23–29. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-6-23-29.

Введение

Непрерывное прессование способом «Конформ»¹ является одним из перспективных методов получения длинномерных изделий. К его основным до-

стоинствам можно отнести низкую себестоимость производства, незначительное количество отходов, достаточно высокую технологическую гибкость за счет быстрой смены инструмента, обеспечение высоких скоростей прессования, отсутствие необходимости предварительного нагрева заготовки [1, 2].

¹ Далее по тексту используется термин «непрерывное прессование».

Технология «Conform» была разработана группой ученых Управления по атомной энергетике Великобритании (УКАЕА) для получения длинномерных калиброванных прутков, трубок, профилей из цветных металлов [3, 4]. Свое развитие метод получил в ходе дальнейших исследований, при проведении которых в качестве заготовок для прессования в основном использовали компактные материалы.

В то же время в ряде работ была показана возможность использования в качестве заготовок для непрерывного прессования некомпактных [5, 6], в том числе и композитных [7], материалов и дано обоснование эффективности применения такой технологической схемы. Ее явными преимуществами являются отсутствие предварительной операции брикетирования и возможность получения изделий с плотностью, близкой к теоретической.

Однако, несмотря на очевидные достоинства, метод непрерывного прессования некомпактных материалов не нашел широкого применения в промышленности. Это вызвано его недостаточной технологической проработкой, обусловленной малой изученностью процессов уплотнения, консолидации и течения металла в очаге деформации, отсутствием обоснованных рекомендаций по силовым и температурным условиям прессования, низкой стойкостью прессового инструмента.

Существующие модели процесса непрерывного прессования, в том числе и имитационные, в основном разработаны для описания обработки компактных материалов и направлены на изучение показателей пластического течения металла, расчет силовых параметров процесса, оптимизацию конструкции инструмента и устранение дефектов при прессовании [8–12].

Как известно, процесс залечиваемости повреждений при деформационной обработке некомпактных материалов в общем случае определяется степенью деформации, схемой напряженного состояния, видом траектории деформации, температурой и скоростью деформации [13]. Тем не менее в первом приближении оценку степени консолидации можно провести на основе анализа изменения температуры и гидростатического давления.

В работе [14] предложена модель и приведены результаты, дающие представление об изменении температуры и давления в зависимости от скорости прессования компактного материала. Необходимо отметить, что предложенная модель не учитывает в

полной мере особенностей течения обрабатываемого материала.

Устранение названного недостатка и развитие модели за счет учета большего количества влияющих факторов проведено автором работы [15]. Это позволило ему использовать модель для исследования непрерывного прессования некомпактных алюминиевых материалов $AlSi12$, $AlMgSi0.5$ и $Al99.7$. Распределение температуры и давления в обрабатываемом материале с учетом принятых допущений в работе [15] описывается с помощью одномерной краевой задачи, численно реализованной методом конечных разностей.

Однако одномерная постановка задачи снижает ценность полученных результатов, так как не позволяет учитывать неравномерность распределения исследуемых параметров в объеме обрабатываемого материала. Это является существенным недостатком в связи с тем, что для непрерывного прессования характерно образование двухзонного потока течения металла [16], что ведет к неравномерности распределения гидростатического давления в очаге деформации. Поэтому для получения достоверных данных о распределении искомых величин расчеты необходимо проводить в трехмерной постановке.

С учетом вышеизложенного целью настоящей работы являлось изучение процесса непрерывного прессования некомпактного алюминиевого материала для установления характера изменения энергосиловых параметров (в частности, крутящего момента рабочего колеса), температуры и гидростатического давления в области деформационной обработки. Учитывая, что визуальное представление поведения некомпактного материала при непрерывном прессовании методами физического моделирования не представляется возможным, при проведении исследований использован подход, успешно примененный в работе [17]:

- предварительно экспериментально определены температура и силовые параметры прессования;
- на основе полученных данных разработана и отлажена имитационная модель процесса.

Совместный анализ результатов моделирования и экспериментальных данных позволил получить качественное представление о поведении некомпактного алюминиевого материала при деформационной обработке и количественные оценки изменения интересующих параметров в процессе непрерывного прессования.

Экспериментальное исследование

Крутящий момент рабочего колеса (M) и температуру (θ) изучали при прессовании шихты на установке Конформ-350 по схеме, показанной на рис. 1. В качестве шихты использовали гранулы размером 1–2 мм из алюминиевого сплава Al–1,5мас.%Mg. Прессование проводили с предварительным нагревом инструмента до 380 °С и скоростью вращения рабочего колеса 4 об/мин, что позволило осуществлять процесс деформирования в условиях, рекомендованных для алюминиевых сплавов (температура ~460 °С, скорость истечения металла ~9 м/мин). Коэффициент вытяжки составлял $\lambda_{\Sigma} = 6$.

В связи с невозможностью определения температуры непосредственно в очаге деформации ее измеряли на одном из элементов прессового инструмента — упоре (см. рис. 1, поз. 4), который наиболее близко

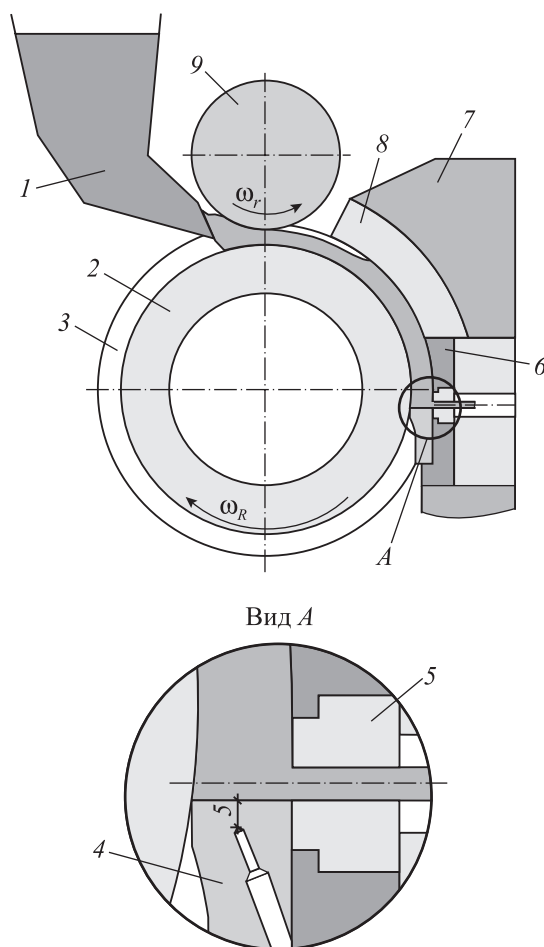


Рис. 1. Схема процесса непрерывного прессования

1 — шихта; 2 — рабочее колесо; 3 — ручей рабочего колеса; 4 — упор; 5 — матрица; 6 — матрицедержатель; 7 — башмак; 8 — входной блок; 9 — прижимной ролик

расположен к очагу деформации, образуя его нижнюю границу. При этом использовали хромель-копелевую термопару, установленную в теле упора на расстоянии 5 мм от его рабочей поверхности. Энергосиловые параметры процесса непрерывного прессования определяли пересчетом силы тока электродвигателя установки в крутящий момент.

Для сбора и обработки экспериментальных данных применялось оборудование фирмы «National Instruments». Запись, обработка и визуализация результатов опытов осуществлялись в программном комплексе LabVIEW DAQmx. Для этого в среде LabVIEW был разработан виртуальный прибор контроля экспериментальных данных. В соответствии с его настройками запись сигнала со всех датчиков проходила в параллельном режиме, частота опроса составляла 0,5 кГц.

Проведение серии экспериментов позволило получить сведения об изменении энергосиловых параметров процесса непрерывного прессования и соответствующих им значениях температуры на нижней границе очага деформации.

Качественно схожий характер экспериментальных зависимостей и малая величина дисперсии данных дают основание считать, что полученные графики (рис. 2) изменения крутящего момента (M) и температуры (θ) являются типичными для процесса непрерывного прессования некомпактного алюминиевого сплава с предварительным нагревом инструмента.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2, позволяет выделить 3 стадии процесса непрерывного прессования:

- начальная, характеризующаяся неустановившимся течением металла и максимальными значениями силовых параметров;
- основная, характерным признаком которой является установившийся режим течения металла, при котором температура очага деформации и силовые параметры остаются постоянными во времени;
- заключительная, когда прекращается пластическое течение металла, вследствие чего изучаемые параметры снижаются до начальных значений.

Необходимо отметить, что продолжительность основной стадии при соответствующем охлаждении лимитируется лишь стойкостью прессового инструмента и значительно превышает первую и третью стадии.

Рассмотрим подробно все этапы непрерывного прессования некомпактного материала и опишем

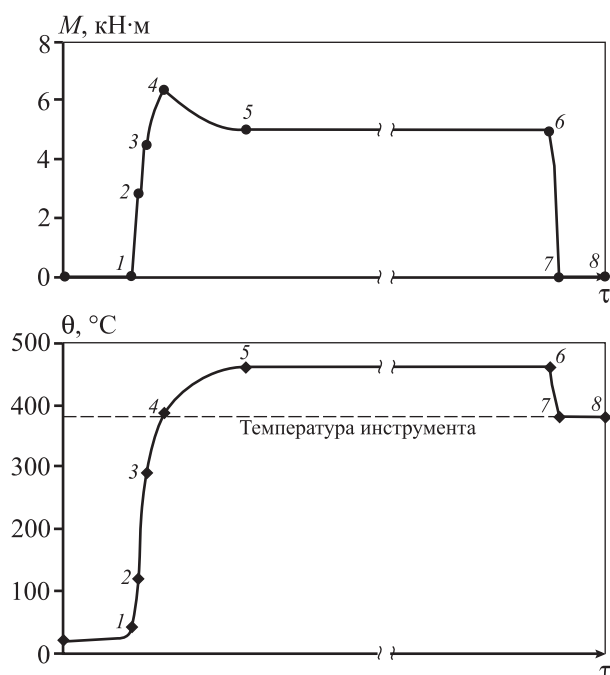


Рис. 2. График изменения силовых параметров и температуры при прессовании

№ точки	M , кН·м	θ , °С
1	0	42
2	2,86	120
3	4,52	290
4	6,41	385
5	5,04	460
6	5,04	460
7	0	380

протекающие во время них процессы на основе суммарного анализа результатов эксперимента и имитационного моделирования.

Участок 0—5 на рис. 2 соответствует начальной стадии прессования. На отрезке 0—1 происходят захват и запрессовка шихты в ручей вращающегося рабочего колеса прижимным роликом, что по сути аналогично процессу асимметричной прокатки с защемлением в калибре. В зоне контакта стенок ручья и подпрессованной шихты начинают действовать активные силы трения, за счет которых осуществляется подача обрабатываемого материала в контейнер до контакта с упором. Контейнер представляет собой ограниченную область пространства, образованную поверхностями рабочего колеса, матрицедержателя и входного блока (см. рис. 1).

При контакте с упором, осуществляемом в т. 1, последовательно протекают процессы уплотнения, распрессовки и заполнения контейнера прессуемым материалом, что ведет к увеличению крутя-

щего момента (см. участок 1—2). Наблюдаемое при этом повышение температуры обрабатываемого материала обусловлено процессом передачи тепла от предварительно нагретого прессового инструмента и работой деформации. В т. 2 происходит изменение траектории деформации и начинается истечение прессуемого материала из контейнера в выходной канал матрицы. Это ведет к увеличению работы деформации и реактивных сил трения, что способствует росту не только крутящего момента, но и температуры очага деформации (см. участок 2—3). Повышение скорости истечения металла в выходном канале матрицы ведет к возрастанию величины сопротивления деформации. Это способствует увеличению объема металла в контейнере, вследствие чего растут силы реактивного трения и температура очага деформации (см. участок 3—4). Необходимо отметить, что величина крутящего момента в т. 4 достигает максимального значения. С увеличением температуры напряжение течения снижается, как следствие, уменьшается крутящий момент (см. участок 4—5). В т. 5 система достигает равновесного состояния.

Отрезок 5—6 соответствует основной стадии процесса непрерывного прессования. Объем прессуемого материала в контейнере становится постоянным, как и очаг деформации, при этом температура последнего имеет максимальное значение.

На участке 6—7 прекращается подача шихты, что приводит к освобождению контейнера от обрабатываемого материала и завершению процесса прессования.

Полученные экспериментальные данные позволили разработать и отладить 3-мерную имитационную модель непрерывного прессования некомпактного алюминиевого материала, учитывающую все описанные стадии процесса.

Теоретические исследования

Изучение особенностей изменения температуры (θ) и гидростатического давления (p) в области деформационной обработки на основной стадии процесса проводили с помощью имитационного моделирования. Численная реализация 3-мерной имитационной модели выполнена с помощью программного комплекса Deform 3D. Оценка достоверности результатов моделирования проведена путем сравнения расчетных и экспериментальных значений крутящего момента (M). Установлено, что рас-

хождение не превысило 14 %, что позволяет говорить о корректности используемых граничных условий и применить имитационную модель для изучения процесса непрерывного прессования некомпактного алюминиевого материала.

С помощью 3-мерной имитационной модели проведены серии расчетов с различными конструктивными и технологическими параметрами процесса непрерывного прессования. При расчетах угол, характеризующий изменение траектории деформации, принимал значения в диапазоне $\Phi = 90^\circ \div 120^\circ$, коэффициент вытяжки $\lambda_{\Sigma} = 2 \div 6$, фактор трения, используемый при расчете реактивных сил трения, $m = 0,1 \div 0,4$.

Исследование изменения величин θ и p проводили вдоль линий тока. Общей особенностью для всех рассмотренных случаев непрерывного прессования является неоднородность температуры (~6 %) и гидростатического давления (~30 %) в очаге деформации.

В ходе суммарного анализа изменения θ и p на основной стадии прессования выявлено 7 зон (см. I–VII на рис. 3), качественно характеризующих протекание процесса прессования, причем их наличие характерно для всех рассмотренных вариантов изменения конструктивных и технологических параметров.

Графики изменения температуры и гидростатического давления, соответствующие условиям эксперимента и построенные по меридианной плоскости для 3 линий тока, показаны на рис. 3. Выбор линий тока обусловлен качественным изменением в характере распределения величин θ и p .

В зоне I осуществляется предварительное уплотнение некомпактного материала за счет запрессовки его прижимным роликом в ручей рабочего колеса, из-за чего в ней и последующих зонах на контактных поверхностях ручья начинают действовать активные силы трения.

В зоне II происходит постепенный нагрев предварительно уплотненного материала, и для нее не отмечено изменений плотности и гидростатического давления.

В зоне III наблюдается значительный рост гидростатического давления и, как следствие, плотности, что совместно с деформирующим усилием ведет к полному заполнению прессуемым материалом пространства между рабочим колесом и входным блоком к концу данной зоны. За счет этого увеличивается площадь контактирующих поверхностей и растет сила реактивного трения, вследствие чего происходит разогрев прессуемого материала.

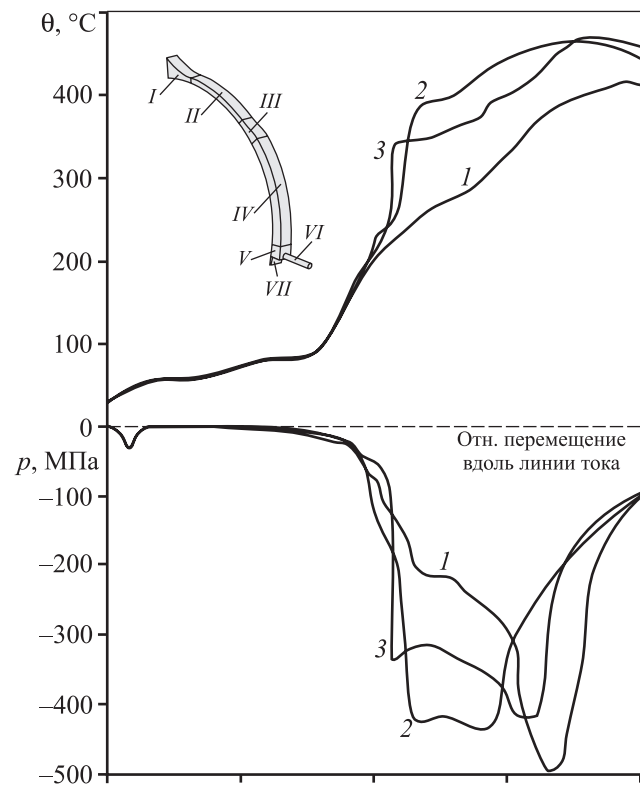


Рис. 3. График изменения температуры и гидростатического давления при непрерывном прессовании

Расчет соответствует условиям эксперимента

1 – контактная линия тока со стороны рабочего колеса;

2 – осевая линия тока; 3 – контактная линия тока со стороны матрицедержателя

Однако температура IV зоны недостаточна для выдавливания материала в зазор между наружной цилиндрической поверхностью колеса и камерой, что способствует резкому увеличению гидростатического давления, которое ведет к доуплотнению прессуемого материала.

В зоне V достигается наибольшее значение p , и одновременно с этим температура материала, обусловленная работой деформации и реактивных сил трения, достигает величины, позволяющей осуществить выдавливание материала через выходное отверстие матрицы. В ходе выдавливания из-за изменения траектории течения материала создаются интенсивные сдвиговые деформации, которые ведут к разрушению оксидных слоев на поверхности частиц, обнажению ювенильных поверхностей. Это повышает количество очагов пластической сварки и способствует более интенсивному переходу обрабатываемого материала в компактное состояние.

В зоне VI происходит деформирование компактного материала. При этом величина гидростатического давления снижается, а температура достигает максимального значения.

Также необходимо отметить наличие зоны VII, которая не оказывает значимого влияния на деформацию материала в пятой зоне, но является дополнительным источником тепла из-за трения упора об облой, уходящий в зазор между ручьем и упором.

Таким образом, предложенное позонное представление дает более полное понимание процессов, происходящих в области деформационной обработки, и может быть использовано для разработки постадийной аналитической модели консолидации некомпактного алюминиевого материала при непрерывном прессовании.

Выводы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Установлен характер изменения и получены численные значения крутящего момента (M) и температуры (θ) очага деформации (см. таблицу под рис. 2) при непрерывном прессовании (с предварительным подогревом инструмента) некомпактного материала Al—1,5мас.%Mg.

2. Выявлены особенности изменения θ и p в зоне деформационной обработки указанного сплава. Отмечена существенная неоднородность гидростатического давления, что может привести к неоднородности свойств получаемых заготовок.

3. На основе анализа результатов исследований выявлено 7 зон, качественно характеризующих протекание процесса непрерывного прессования некомпактного алюминиевого материала. Предложенное позонное представление дает более полное понимание процессов, происходящих в области деформационной обработки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 15-08-08032 и гранта президента РФ для молодых ученых — кандидатов наук МК-3040.2015.8.

Литература

1. Сергеев В.М., Горохов Ю.В., Соболев В.В., Нестеров Н.А. Непрерывное литье—прессование цветных металлов. М.: Металлургия, 1990.
2. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. М.: МАКС Пресс, 2005.
3. Green D. Improvements in or Relating to Extrusion: Pat. 1370894 (UK). 1972.
4. Green D. Continuous Extrusion-Forming of Wire Sections // J. Inst. of Metals. 1972. Vol. 100. P. 295—300.
5. Pradoo J.A. Update the conform continuous extrusion process // International Wire Association. 1977. Vol. 47. P. 82—87.
6. Schatzberg S.E., Seline D.W. Continuous extrusion of copper powder into wire shapes // Wire J. International. 2000. Vol. 33. No. 11. P. 96—100.
7. Heywood J., Treadwell C. Aluminium alloy and composite extrusion by Conform process // Aluminum Alloys. New Technologies: Proc. Inter. Conf. Marina di Ravenna. 1993. P. 77—85.
8. Cho J.R., Jeong H.S. Parametric investigation on the surface defect occurrence in CONFORM process by finite element method // J. Mater. Process. Technol. 2000. Vol. 136. P. 236—243.
9. Cho J.R., Jeong H.S. Parametric investigation on the curling phenomenon in CONFORM process by three-dimensional finite element analysis // J. Mater. Process. Technol. 2001. Vol. 110. P. 53—60.
10. Сергеев В.М., Шеркунов В.Г., Горохов Ю.В., Гилевич Ф.С., Милько В.Е. Силовые условия непрерывного прессования металла // Цв. металлы. 1989. No. 7. С. 113—116.
11. Сергеев В.М., Шеркунов В.Г., Горохов Ю.В., Гилевич Ф.С., Довженко Н.Н. Расчет оптимальной геометрии инструмента при непрерывном прессовании металла // Металлы. 1990. No. 4. С.183—187.
12. Fan Z.X., Song B.Y., Yun X.B., Mohanraj J., Barton D.C. An analysis of the contact stress distribution at the surface of the tooling during the CONFORM process // J. Process Mech. Eng. Pt. E. 2009. Vol. 223. P. 223—243.
13. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Демин В.А. Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов. М.: Физматлит, 2011.
14. Maddock B. Structure and Development of a Computer Model to Simulate the Conform Process // Mater. of 7-th Inter. Aluminum Extrusion Technical Seminar (May 2000). Chicago. Vol. 1. P. 519—531.
15. Stadelmann C. Extrusion von Metallpulvern durch kontinuierliches Pulverstrangpressen: Doctoral Thesis. Universität Erlangen—Nürnberg zur Erlangung des Grades. 2009.
16. Clode M.P., Carr N., Ahmad H. Simulation and Analysis of Deformation in Conform Extrusion // Mater. of 6-th Inter. Aluminum Extrusion Technical Seminar. Chicago. May 1996. Vol. 2. P. 441—448.

17. Белевич А.В., Бабин Д.М., Гладков Ю.А., Аборкин А.В., Захаров А.А. Моделирование и исследование технологических процессов обработки металлов давлением. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2012.

References

1. Sergeev V.M., Gorokhov Yu.V., Sobolev V.V., Nesterov N.A. Npreryvnoe lit'e-pressovanie tsvetnykh metallov [Continuous casting-molding of nonferrous metals.]. Moscow: Metallurgiya, 1990.
2. Sidel'nikov S.B., Dovzhenko N.N. Zagirov N.N. Kombinirovannyye i sovmeshchennyye metody obrabotki tsvetnykh metallov i splavov [Combined processing methods and combinations of nonferrous metals and alloys]. Moscow: MAKS Press, 2005.
3. Green D. Improvements in or Relating to Extrusion: Pat. 1370894 (UK). 1972.
4. Green D. Continuous Extrusion-Forming of Wire Sections. *J. Inst. of Metals*. 1972. Vol. 100. P. 295—300.
5. Pradon J.A. Update the conform continuous extrusion process. *International Wire Association*. 1977. Vol. 47. P. 82—87.
6. Schatzberg S.E., Seline D.W. Continuous extrusion of copper powder into wire shapes. *Wire J. International*. 2000. Vol. 33. No. 11. P. 96—100.
7. Heywood J., Treadwell C. Aluminium alloy and composite extrusion by Conform process. In: *Aluminum Alloys. New Technologies: Proc. Inter. Conf. Marina di Ravenna*. 1993. P. 77—85.
8. Cho J.R., Jeong H.S. Parametric investigation on the surface defect occurrence in CONFORM process by finite element method. *J. Mater. Process. Technol.* 2000. Vol. 136. P. 236—243.
9. Cho J.R., Jeong H.S. Parametric investigation on the curling phenomenon in CONFORM process by three-dimensional finite element analysis. *J. Mater. Process. Technol.* 2001. Vol. 110. P. 53—60.
10. Sergeev V.M., Sherkunov V.G., Gorokhov Yu.V., Gilevich F.S., Mil'ko V.E. Silovye usloviya nepreryvnogo pressovaniya metalla [Power conditions of continuous extrusion of metal]. *Tsvetnye metally*. 1989. No. 7. P. 113—116.
11. Sergeev V.M., Sherkunov V.G., Gorokhov Yu.V., Gilevich F.S., Dovzhenko N.N. Raschet optimal'noi geometrii instrumenta pri nepreryvnom pressovanii metalla [The calculation of the optimum geometry of the tool in continuous extrusion of metal]. *Metally*. 1990. No. 4. P. 183—187.
12. Fan Z.X., Song B.Y., Yun X.B., Mohanraj J., Barton D.C. An analysis of the contact stress distribution at the surface of the tooling during the CONFORM process. *J. Process Mech. Eng. Pt. E*. 2009. Vol. 223. P. 223—243.
13. Shestakov N.A., Subich V.N., Demin V.A. Uplotnenie, konsolidatsiya i razrushenie poristyykh materialov [Compaction, consolidation and destruction of porous materials]. Moscow: Fizmatlit, 2011.
14. Maddock B. Structure and Development of a Computer Model to Simulate the Conform Process. In: *Mater. of 7-th Inter. Aluminum Extrusion Technical Seminar* (May 2000). Chicago. Vol. 1. P. 519—531.
15. Stadelmann C. Extrusion von Metallpulvern durch kontinuierliches Pulverstrangpressen: Doctoral Thesis. Universität Erlangen—Nürnberg zur Erlangung des Grades. 2009.
16. Clode M.P., Carr N., Ahmad H. Simulation and Analysis of Deformation in Conform Extrusion. In: *Mater. of 6-th Inter. Aluminum Extrusion Technical Seminar* (May 1996). Chicago. Vol. 2. P. 441—448.
17. Belevich A.V., Babin D.M., Gladkov Yu.A., Aorkin A.V., Zakharov A.A. Modelirovanie i issledovanie tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem [Simulation and research of technology of metal forming processes]. Vladimir: Vladimir State University, 2012.