

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОШИВКИ СЛИТКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В ДВУХВАЛКОВОМ СТАНЕ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

© 2018 г. М.М. Скрипаленко, Б.А. Романцев, В.Е. Баженов, Б.Х. Чан, М.Н. Скрипаленко,
С.П. Галкин, М.Б. Савонькин, Ю.А. Гладков

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

ООО «КванторФорм», г. Москва

Статья поступила в редакцию 17.11.17 г., доработана 11.01.18 г., подписана в печать 22.01.18 г.

Проведена прошивка алюминиевых слитков, полученных наполнительным литьем, в двухвалковом стане винтовой прокатки с направляющими линейками на оправках различной формы со сферической рабочей частью – сплошной, с углублением и поллой. Оправки имели одинаковый диаметр калибрующего участка. Прошивка осуществлялась при температуре слитков 400 °С. Исследовано влияние формы оправки на изменение наружного диаметра и толщины стенки по длине гильзы, а также плотности гильзы по длине. Для измерения плотности гильз они были разрезаны на 15 равных по толщине колец, плотность которых определялась с помощью гидростатического взвешивания. Экспериментальные исследования смоделированы с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа. Получение слитка наполнительным литьем моделировалось с помощью ProCAST, а прошивки – QForm. Путем компьютерного моделирования также оценивались изменения диаметра, толщины стенки и плотности гильз по длине. Проведено сравнение результатов экспериментальных исследований и компьютерного моделирования с целью оценки адекватности полученных моделей в QForm. Отличие данных по плотности не превышает 2 %, по размерам гильз – 20 %. Полученные результаты позволили установить влияние формы прошивной оправки на точность получаемых гильз и их плотность. С точки зрения точности размеров получаемых гильз наиболее предпочтительно использовать полую оправку или оправку с углублением. Каждая из рассмотренных схем прошивки позволяет уплотнить до истинной плотности весь объем гильзы, за исключением при- торцевых областей, где плотность ниже на 1 %.

Ключевые слова: наполнительное литье, ProCast, компьютерное моделирование, прошивка, винтовая прокатка, двухвал- ковый стан, QForm, плотность, толщина стенки, диаметр.

Скрипаленко М.М. – канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением (ОМД) НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр., 4). E-mail: mms@isis.ru.

Романцев Б.А. – докт. техн. наук, профессор кафедры ОМД НИТУ «МИСиС». E-mail: boralr@yandex.ru.

Баженов В.Е. – канд. техн. наук, доцент кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов НИТУ «МИСиС». E-mail: V.E.Bagenov@gmail.com.

Чан Б.Х. – аспирант кафедры ОМД НИТУ «МИСиС». E-mail: tbh510@gmail.com.

Скрипаленко М.Н. – канд. техн. наук, доцент кафедры ОМД НИТУ «МИСиС». E-mail: tfsmn@yandex.ru.

Галкин С.П. – докт. техн. наук., профессор кафедры ОМД НИТУ «МИСиС». E-mail: glk-omd@yandex.ru.

Савонькин М.Б. – ст. преподаватель кафедры ОМД НИТУ «МИСиС». E-mail: smb018@yandex.ru.

Гладков Ю.А. – канд. техн. наук, руководитель отдела продаж и сопровождения ООО «КванторФорм» (115088, г. Москва 2-й Южнопортовый пр., 16, стр. 2). E-mail: gladyuri@qform3d.ru.

Для цитирования: Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Баженов В.Е., Чан Б.Х., Скрипаленко М.Н., Галкин С.П., Савонькин М.Б., Гладков Ю.А. Компьютерное моделирование процессов прошивки слитков из алюминиевого сплава в двухвалковом стане винтовой прокатки. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2018. No. 6. С. 42–50. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-6-42-50.

Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Bazhenov V.E., Tran B.H., Skripalenko M.N., Galkin S.P., Savonkin M.B., Gladkov Yu.A.

FEM simulation of Mannesmann piercing of aluminum alloy ingots

Mannesmann piercing of ingots, which were made of aluminum alloy by casting, was done using plugs of different shape: entire plug, plug with cavity and hollow plug. Plugs had same diameter of calibrating segment. Piercing was carried out at 400 °C of billets. Influence of plugs' shape on variation of hollow shells' diameter, wall thickness and density along their length was estimated. Hollow shells

were cut into 15 equal rings to measure density using hydrostatic (Archimedean) weighing. Experimental operations were simulated using FEM computer software. Casting was simulated using ProCAST, piercing — using QForm. Variation of hollow shells' diameter, wall thickness and density along their length was estimated after simulation had been done. Experimental and simulation data were compared to check FEM simulation accuracy. Difference between experiment and simulation for density was not more than 2 %, for hollow shells' dimensions — 20 %. Conducted investigation allowed estimation of how plug's shape affects hollow shells' dimensions accuracy and density. It was established that hollow plug or plug with cavity, in terms of dimensions accuracy and density variation, are preferable for piercing. Each of plugs being used, provides manufacturing of hollow shells with maximum density for all volume except close to hollow shell's edges domains, where density is 1 % less than maximum value.

Keywords: ingot casting, ProCAST, computer simulation, piercing, screw rolling, Mannesmann rolling mill, QForm, density, wall thickness, diameter.

Skipalenko M.M. — Cand. Sci. (Tech.), Associate prof., Department of metal forming (MF), National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: mms@misis.ru.

Romantsev B.A. — Dr. Sci. (Tech.), Prof., Department of MF, NUST «MISIS». E-mail: boralr@yandex.ru.

Bazhenov V.E. — Cand. Sci. (Tech.), Associate prof., Department of foundry technologies and material art working, NUST «MISIS». E-mail: V.E.Bagenov@gmail.com.

Tran B.H. — Postgraduate student, Department of MF, NUST «MISIS». E-mail: tbh510@gmail.com

Skipalenko M.N. — Cand. Sci. (Tech.), Associate prof., Department of MF, NUST «MISIS». E-mail: tfsmn@yandex.ru.

Galkin S.P. — Dr. Sci. (Tech.), Prof., Department of MF, NUST «MISIS». E-mail: glk-omd@yandex.ru.

Savonkin M.B. — Senior teacher, Department of MF, NUST «MISIS». E-mail: smb018@yandex.ru.

Gladkov Yu.A. — Cand. Sci. (Tech.), Head of Sales and maintenance department, LLC «QuantorForm» (115088, Russia, Moscow, 2-nd Yuzhnoportoviy pr., 16, buil. 2). E-mail: gladyuri@qform3d.ru.

Citation: Skipalenko M.M., Romantsev B.A., Bazhenov V.E., Tran B.H., Skipalenko M.N., Galkin S.P., Savonkin M.B., Gladkov Yu.A. FEM simulation of Mannesmann piercing of aluminum alloy ingots. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2018. No. 6. P. 42–50 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-6-42-50.

Введение

Исследование пластического поведения литого металла при обработке давлением относится к числу задач, имеющих существенное практическое и теоретическое значение. Особенно это актуально для наиболее сложных процессов прокатки, таких как винтовая. Процесс прошивки в стане винтовой прокатки (так называемом стане Маннесманна) [1] вот уже более 130 лет составляет основу производства бесшовных труб, благодаря разрыхляющим условиям деформации осевой зоны заготовки (эффекту Маннесманна). При этом процесс обладает свойством траекторного управления. Изменением угла подъема траекторий геликоидального истечения удастся подавить этот эффект и создавать технологии и станы винтовой прокатки обратного назначения — для уплотнения сплошных сечений [2].

Процессы прошивки в двухвалковых станах достаточно успешно моделировались с помощью различных вычислительных сред конечно-элементного анализа. В работе [3] применялась программа QForm для оценки энергосиловых параметров и напряженно-деформированного состояния при прошивке в двухвалковом стане с направляющими линейками. Вычислительная среда DEFORM использовалась при исследовании процесса раз-

рушения при прошивке [4]. Этот же процесс авторы [5] моделировали с помощью программного продукта MSC.SuperForm для изучения особенностей напряженно-деформированного состояния, распределения температуры и оценки энергосиловых параметров. В работе [6] процесс прошивки в двухвалковом стане с направляющими дисками — так называемом стане Дишера — смоделирован с помощью Simufact.Forming 10.0 и проведена верификация полученных результатов сравнением с данными опытных прошивок. Вычислительная среда конечно-элементного анализа METFOR использовалась для комплексного исследования при моделировании процесса прошивки в двухвалковом стане с направляющими линейками [7]. Программа Abaqus/Explicit 6.9 применялась для расчета осевого усилия на оправку [8].

Прошивке могут подвергаться заготовки с литой структурой — слитки или непрерывно-литые заготовки [9]. В этом случае интерес представляет влияние режимов деформации и калибровки рабочего инструмента на изменение исходной пористости металла литой заготовки.

В последнее десятилетие появилась возможность моделировать процесс обработки давлением

с учетом свойств литой заготовки. Подобные решения представлены в нескольких исследованиях. Программные продукты компании «Transvalor» (Франция) применялись для компьютерного моделирования процессовковки слитка [10, 11]. Вычислительные среды DEFORM и ProCAST востребованы для компьютерного моделирования процесса прошивки слитка на прессе [12]. В работе [13] для моделирования процессаковки слитка использовались ProCAST и QForm, а в [14] эти же программные продукты позволили выявить недостатки конструкции оправки при прошивке слитков.

Задачами настоящей работы являлись компьютерное моделирование процессов получения слитков наполнительным литьем и их прошивки в двухвалковом стане с направляющими линейками на оправках различной формы и верификация полученных данных путем сравнения их с результатами опытных прошивок по следующим параметрам: толщина стенки и наружный диаметр гильз, а также их плотность.

Методика проведения исследований

В качестве шихты использовали лом сплава АД31 ГОСТ 4784-97. Плавку вели в графитшамотном тигле в печи сопротивления. Рафинирование расплава от неметаллических включений проводили флюсом ARSAL 2125 фирмы «Schafer Chemische Fabrik GmbH» (Германия) при $t = 760^\circ\text{C}$, а дегазацию — с помощью гексахлорэтана (C_2Cl_6) при той же температуре. После рафинирования расплав выдерживали 15 мин и заливали при $t = 740^\circ\text{C}$ в изложницу из сплава АК7 (ГОСТ 1583-93), подогретую до 150°C . В результате получены слитки диаметром 60 мм и высотой 210 мм. Изложницу окрашивали краской Cillolin Al285 также от «Schafer Chemische Fabrik GmbH».

Прошивку полученных наполнительным литьем слитков проводили на двухвалковом прошивном стане МИСиС-130Д [14] по бочковидной схеме (угол раскатки 0°) при угле подачи валков $\beta = 14^\circ$. В качестве направляющего инструмента использовались линейки. Расстояние между валками в пережиме составляло 52 мм, между линейками — 60,5 мм. Валки в пережиме были диаметром 410 мм, длина участка пережима составляла 10 мм, входной и заходной конусы имели одинаковую длину и угол 3° , частота вращения валков — 50 об/мин (рис. 1). Заготовки перед прокаткой нагревали до 400°C в камерной электропечи с силитовыми на-

гревателями. Оправка в процессе прошивки имела возможность вращаться вокруг своей оси при контакте с прошиваемой заготовкой.

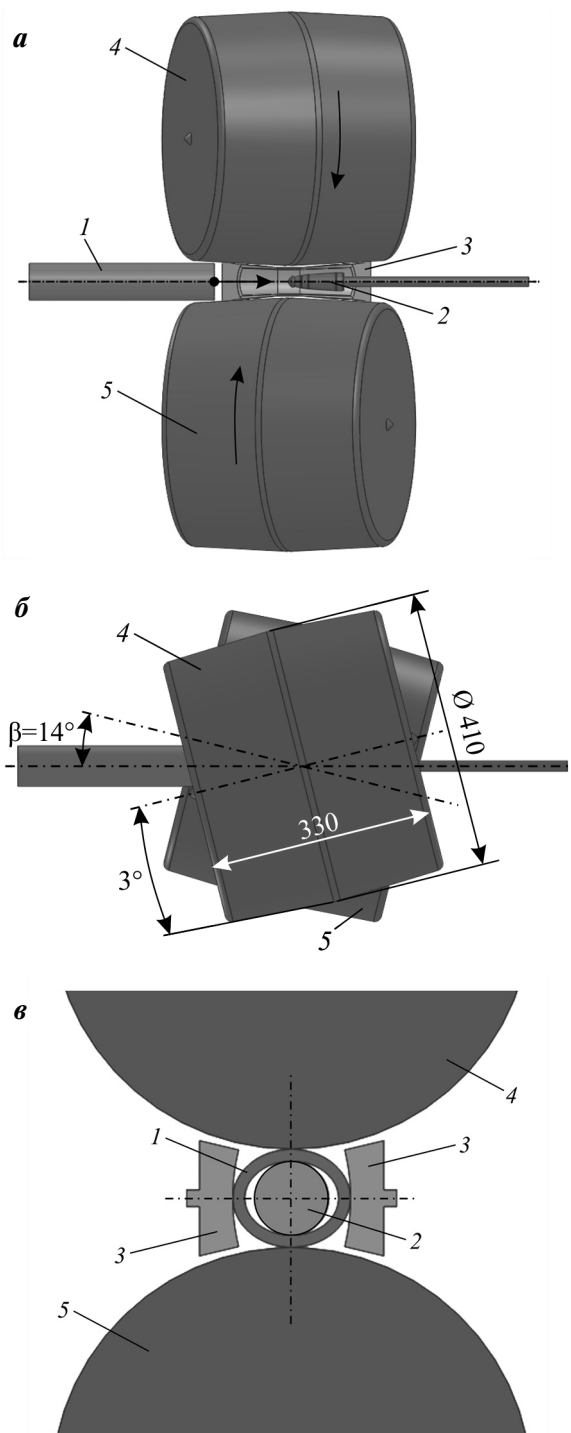


Рис. 1. Схема прошивки в двухвалковом стане МИСиС-130Д

а — вид сбоку (для удобства визуализации одна из линеек не показана), *б* — вид сверху, *в* — вид спереди
1 — заготовка, 2 — оправка, 3 — линейка, 4 — верхний валок, 5 — нижний валок

Для прошивки слитков использовали три вида оправок: сплошную, с углублением и полую (рис. 2). По сравнению с работой [14] применили иную конструкцию и калибровку полой оправки, так как в предыдущей конструкции, как показали результаты исследований, она не обеспечивала должного качества получаемых гильз. Полая оправка в рамках данной работы имела меньшую длину и другую форму рабочей части, а калибровка была максимально приближена к калибровке сплошной оправки (рис. 2). Диаметр каждой оправки на калибрующем участке составлял 30 мм. Конструкция оправки с углублением также была изменена по сравнению с работой [14] таким образом, чтобы соблюдались длина и конусность на каждом участке оправки аналогично калибровке сплошной оправки. При прошивке на сплошной оправке ее носик находился на расстоянии 30 мм перед пережимом, оправки с углублением — на 20,6 мм, полой оправки — на 15,5 мм.

По результатам опытных прошивок определяли толщину стенки и диаметр гильз. Измерения толщины стенки проводили вдоль образующей с шагом 10 мм с помощью кронциркуля Mitutoyo IP67 (погрешность не более 0,01 мм), аналогичным образом (также с шагом 10 мм) измеряли диаметр штангенциркулем (погрешность не более 0,05 мм). В каждом сечении выполнено по 3 замера толщины стенки и диаметра.

Для оценки плотности полученных при прошивке гильз использовали гидростатическое взвешивание с помощью весов Scout 2 производства

компании «ОНАУС» (США). Предварительно каждую гильзу разрезали на 15 равных по высоте колец и определяли плотность каждого из них по отдельности.

Для расчета плотности кольца гильзы по результатам гидростатического взвешивания использовали формулу

$$\rho = \frac{m_1 \rho_{\text{в}}}{m_2 - m_3}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды (принята равной 1 г/см³); m_1 — масса кольца при взвешивании на воздухе, г; m_2 — масса кольца, прикрепленного леской к кронштейну, г; m_3 — масса кольца, прикрепленного леской к кронштейну в воде, г.

Для оценки максимально возможной плотности материала слитков из их донной части отрезали цилиндр высотой 3 см и осадил его до высоты 1,5 см. Затем с помощью гидростатического взвешивания измеряли его плотность.

При моделировании процессов заполнения и затвердевания слитка использовали программу ProCAST. Теплофизические свойства сплава рассчитывали с помощью термодинамической базы CompuTherm LLC Database для алюминиевых сплавов, встроенной в программу ProCAST. Были рассчитаны зависимости теплопроводности, энтальпии, плотности, доли твердой фазы сплава АД31 от температуры, а также температуры ликвидуса и солидуса [14]. Адекватность полученных теплофизических свойств сплавов была показана в работах [15, 16]. Расчетная сетка состояла из ~130 000 элементов. Задавался постоянный коэффициент теплопередачи между слитком и формой, равный 1000 Вт/(м²·К). Такое низкое его значение обусловлено наличием слоя краски на поверхности изложницы. Время заполнения было определено при экспериментальных заливках и составляло 3 с. В ProCAST параметр PIPEFS был задан равным нулю, чтобы для всех узлов сетки можно было рассчитать пористость.

Данные о сетке конечных элементов и результаты моделирования в ProCAST (сведения о пористости слитка) сохраняли в виде файла в формате .ntl. Далее результаты моделирования, полученные в ProCAST, загружали в программу QForm V8.

Для создания сборки валкового узла стана МИСиС-130Д использовали программу SolidWorks. Созданную в ней модель сохраняли в формате .step и загружали в QForm (рис. 3).

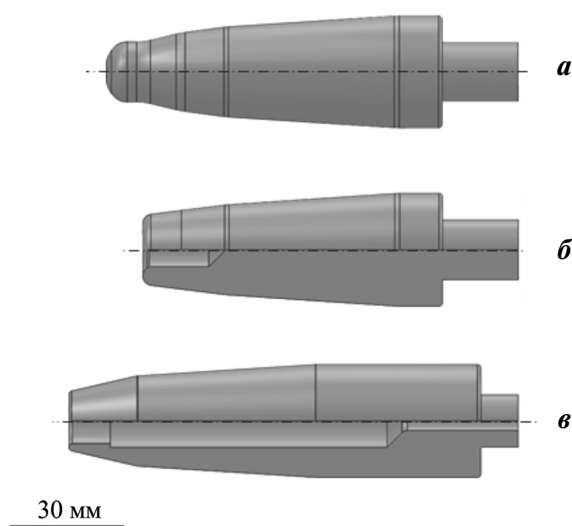


Рис. 2. Оправки для прошивки слитков: сплошная (а), с углублением (б) и полая (в)

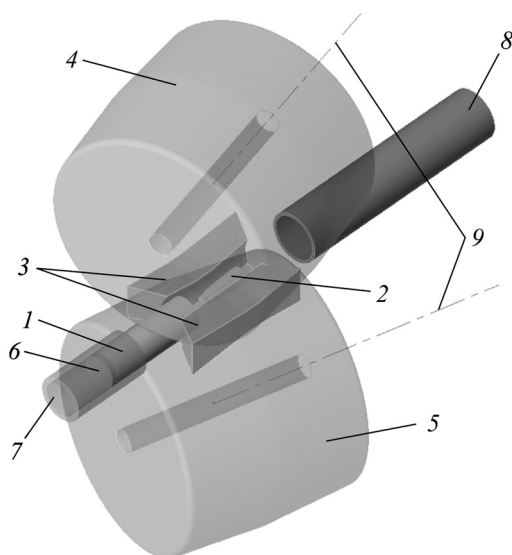


Рис. 3. Сборка для моделирования процесса прошивки в стане МИСиС-130Д, созданная в SolidWorks и загруженная в QForm

1 – заготовка, 2 – оправка, 3 – линейки, 4 – верхний валок, 5 – нижний валок, 6 – толкатель, 7 – входная проводка, 8 – выходная проводка, 9 – оси вращения валков

Прошивку в QForm моделировали согласно настройкам стана МИСиС-130Д и технологическим параметрам при опытных прошивках. Фактор трения, согласно рекомендациям ООО «Квантор-Форм» [17] применительно к винтовой прокатке, для пар «заготовка—валок» был равен 10 — именно такое его значение обеспечило надежный и стабильный захват заготовки валками при компьютерном моделировании прошивки, а для пар «заготовка—линейка» этот фактор задавали равным 0,5. При моделировании в QForm использовали закон трения Леванова [17]. Температура заготовки составляла 400 °С, а температура валков, оправки, линейек, проводок и толкателя — 20 °С. При этом их считали абсолютно жесткими телами.

Теплообмен между заготовкой и инструментами в QForm считали как «простой». При этом температура инструмента была постоянна, за исключением небольшого поверхностного слоя малой толщины. Тепловой поток подводился (или отводился) от заготовки к поверхностному слою инструмента в зависимости от знака разности температур между заготовкой и инструментом. Температура заготовки изменялась в соответствии с уравнением нестационарной теплопроводности с учетом теплообмена с окружающей средой по свободной поверхности. Более подробно об этом режиме можно узнать в [17].

По окончании моделирования в QForm модели полученных гильз сохраняли в формате .stl, загружали в SolidWorks и аналогично измерениям гильз после опытных прошивок определяли изменение диаметра гильзы вдоль образующей с шагом 10 мм и толщины стенки с тем же шагом. Так же по результатам моделирования в QForm каждую гильзу разрезали на 15 равных по высоте колец и для каждого из них рассчитывали среднее значение плотности.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерений наружных диаметров гильз и толщин стенок по длине, по данным опытных прошивок и компьютерного моделирования, показаны на рис. 4 и 5. Согласно рис. 4 разница между максимальным и минимальным значениями наружного диаметра гильзы для сплошной и поллой оправок при опытных прошивках составляет порядка 2,7 мм, для оправки с углублением — 2,1 мм. Разница между максимальным и минимальным значениями толщины стенки гильзы (см. рис. 5) при опытных прошивках для поллой оправки составляет 1,4 мм, сплошной — 2,7 мм, с углублением — 3,1 мм. Анализируя данные обоих рисунков, можно заключить, что использование при прошивке поллой оправки представляется наиболее предпочтительным по сравнению с двумя другими ее модификациями.

Проведено сравнение изменения диаметра и толщины стенки по длине гильз для опытных прошивок с изменением этих же показателей, полученных при компьютерном моделировании (рис. 4—6). Рассчитаны средние значения диаметра и толщины стенки гильзы, а также доверительные интервалы при опытных прошивках и компьютерном моделировании.

Для каждой из оправок отличие результатов компьютерного моделирования от экспериментальных данных по диаметру (см. рис. 4) не превышает 8 %, по толщине стенки (рис. 5) — 11 % для сплошной оправки, 18 % для оправки с углублением и 5 % для поллой оправки. Также из рис. 4—6 видно, что диаметры гильз, полученных опытным путем, больше, чем при моделировании в QForm. При этом их длины по результатам моделирования оказались больше, чем после опытных прошивок. Подобные отличия по длине гильз также получены в работе [14]. Вскрытие (образование) осевой полости в заготовке из несжимаемого материала увеличивает ее диаметр и сокращает длину.

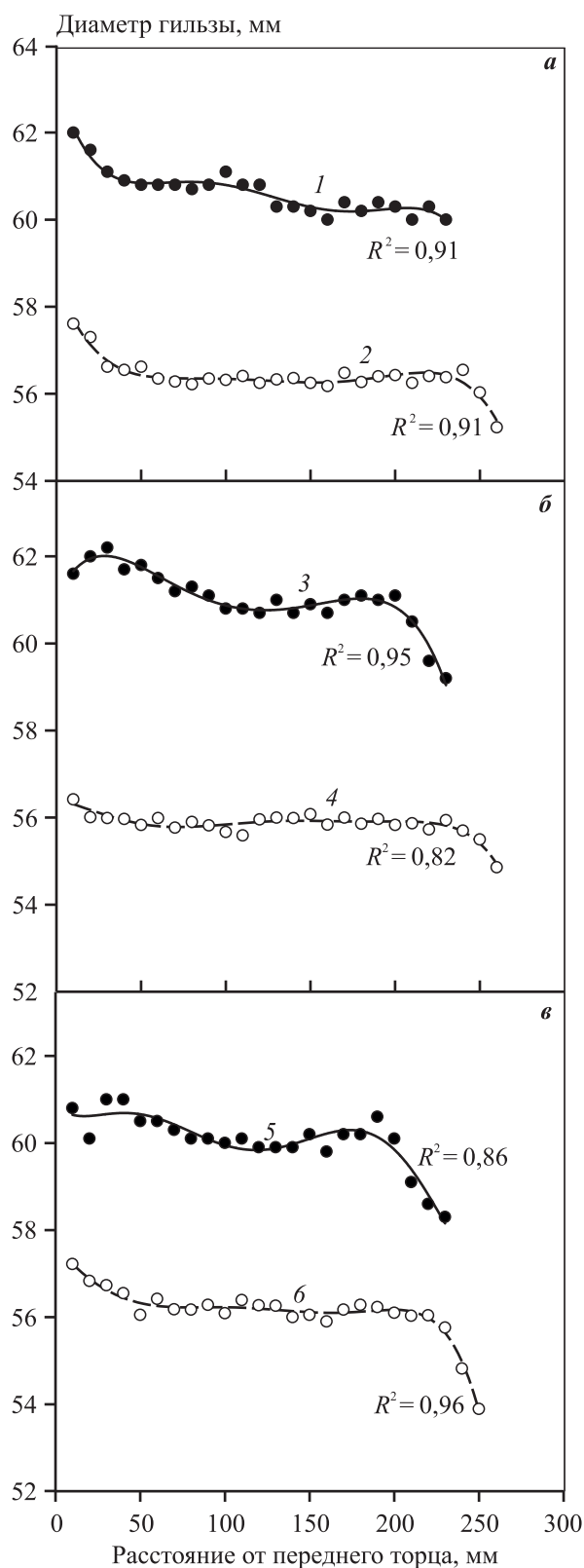


Рис. 4. Сравнительные диаграммы диаметров гильз при опытных прошивках (1, 3, 5) и компьютерном моделировании (2, 4, 6) при использовании сплошной (а), с углублением (б) и полой (в) оправок

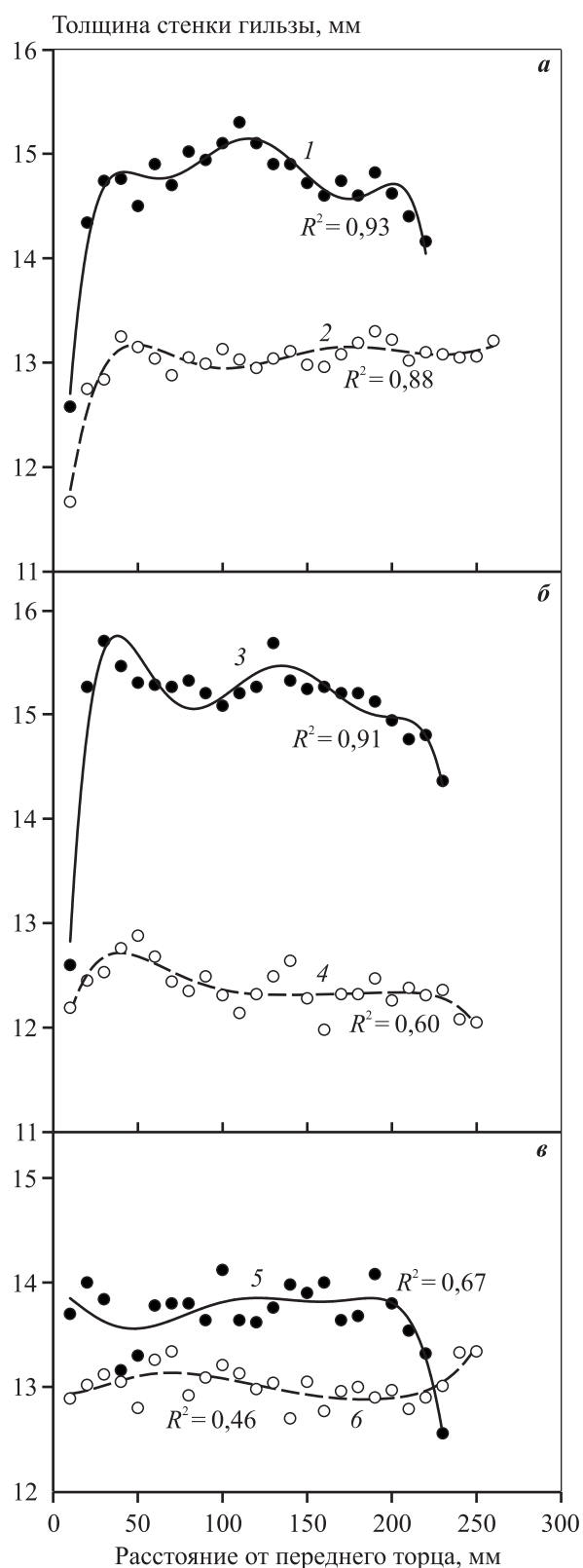


Рис. 5. Сравнительные диаграммы толщин стенок гильз при опытных прошивках (1, 3, 5) и компьютерном моделировании (2, 4, 6) при использовании сплошной (а), с углублением (б) и полой (в) оправок

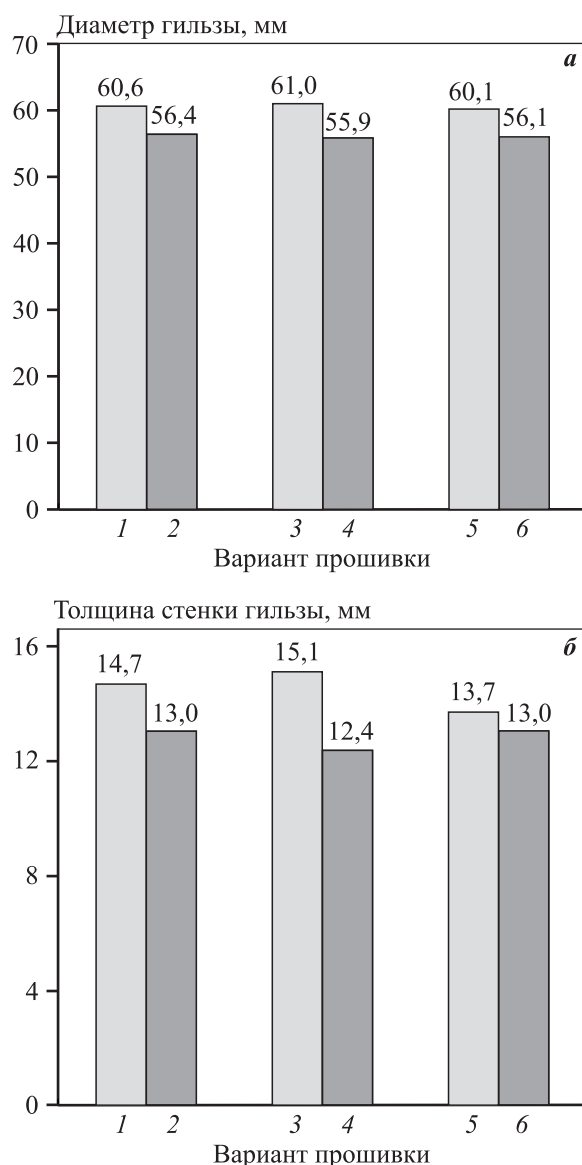


Рис. 6. Средние значения диаметра (а) и толщины стенки (б) гильз при опытных прошивках (1, 3, 5) и компьютерном моделировании (2, 4, 6) при использовании сплошной (1, 2), с углублением (3, 4) и полый (5, 6) оправок

Авторами [18] достаточно эффективно смоделировано образование осевой полости — так называемый эффект Маннесманна — с помощью усовершенствованной модели разрушения Лемэтра [19, 20], но проверена адекватность алгоритма только для одного режима прокатки и одного материала заготовки. В работах [4, 7] предложены способы моделирования осевого разрушения при винтовой прокатке опосредованно и без достаточной проверки на практике, а в [21] — вообще без таковой. В связи с этим приобретает актуальность

вопрос о разработке в дальнейшем способа моделирования эффекта Маннесманна при винтовой прокатке и прошивке, который не нужно было бы адаптировать при изменении технологических параметров прокатки или смены материала деформируемых заготовок.

По результатам опытных прошивок и компьютерного моделирования построили графики изменения плотности гильз по длине после прошивки на различных оправках (рис. 7), а также сравнили сред-

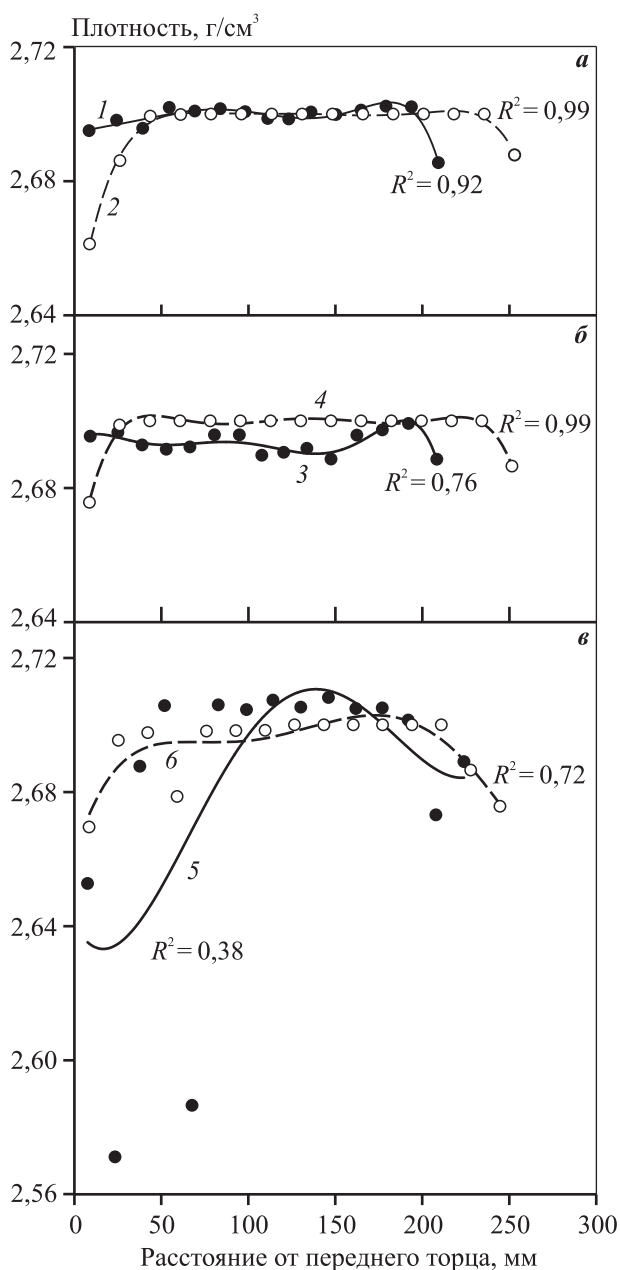


Рис. 7. Изменение плотности металла по длине гильз при компьютерном моделировании (2, 4, 6) и опытных прошивках (1, 3, 5) сплошной (а), с углублением (б) и полый (в) оправками

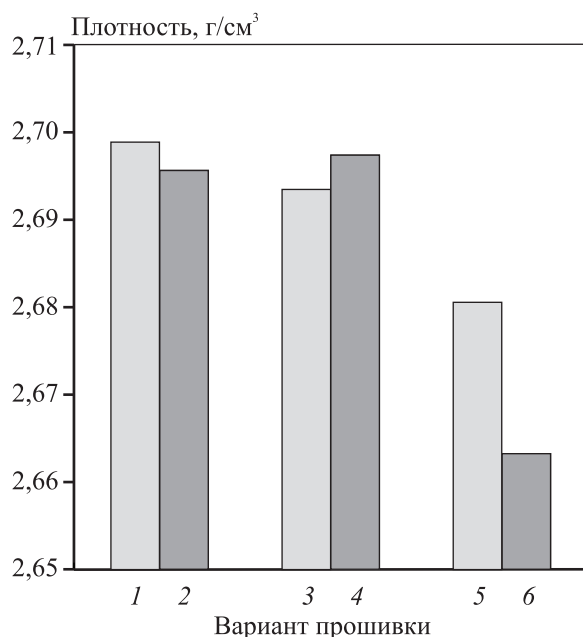


Рис. 8. Средние значения плотности металла гильз при опытных прошивках (1, 3, 5) и компьютерном моделировании (2, 4, 6) при использовании сплошной (1, 2), с углублением (3, 4) и полой (5, 6) оправок

ние значения плотности гильз при компьютерном моделировании и опытных прошивках (рис. 8). По оси абсцисс отложено расстояние от переднего торца гильзы до середины каждого кольца, а по оси ординат — значения плотности для соответствующего кольца. После осадки плотность сплава составляла 2,7 г/см³. Эту величину приняли как истинную плотность сплава при нормальных условиях.

Из рис. 7 видно, что при опытных прошивках, за исключением приторцевых областей гильз, плотность металла достигает значений 2,7–2,71 г/см³, т.е. при прошивке каждой из оправок металл гильзы имеет плотность, сравнимую с истинной плотностью сплава. Результаты компьютерного моделирования качественно отображают такую же тенденцию. Количественно отличия значений плотности гильз при компьютерном моделировании и опытных прошивках, согласно рис. 7 и 8, не превышают 2 %. Вероятной причиной неполного уплотнения приторцевых областей является то, что стадии деформации при винтовой прокатке и прошивке, на которых осуществляется их формоизменение, характеризуются как нестационарные [22]. А схема напряженно-деформированного состояния на подобных стадиях не позволяет деформационно прорабатывать металл так же, как это осуществляется для остального металла на стационарной, т.е. установившейся, стадии прошивки.

Выводы

Проведена прошивка алюминиевых слитков, полученных наполнительным литьем, в двухвалковом стане винтовой прокатки на трех оправках различной формы: сплошной, с углублением и полой. Проведенные эксперименты смоделированы с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа ProCAST и QForm. Исследования позволили установить следующее.

1. Разница между максимальным и минимальным значениями наружного диаметра гильзы для сплошной и полой оправок при опытных прошивках составляет порядка 2,7 мм, для оправки с углублением — 2,1 мм. Разница между максимальным и минимальным значениями толщины стенки гильзы при опытных прошивках для полой оправки составляет 1,4 мм, сплошной — 2,7 мм, с углублением — 3,1 мм. В условиях эксперимента полая оправка позволила получить гильзы с наименьшим колебанием толщины стенки, а оправка с углублением — наименьшее колебание диаметра.

2. При прошивке слитков на каждой из трех оправок, за исключением приторцевых областей, удалось деформационно проработать металл слитков таким образом, чтобы он полностью уплотнился. Вероятной причиной неполного уплотнения приторцевых областей может быть нестационарный характер их деформации при прошивке.

3. При компьютерном моделировании длина гильз получилась больше длины гильз, полученных экспериментально, а диаметр и толщина стенки — меньше. Учитывая имеющийся опыт в моделировании процессов винтовой прокатки и прошивки, предположено, что подобное отличие связано с тем, что при моделировании не учитывалось осевое разрушение заготовки — так называемый эффект Маннесманна. Разработка эффективного способа его моделирования позволит заметно повысить точность результатов компьютерного моделирования процессов винтовой прокатки и прошивки.

4. Плотность гильз при компьютерном моделировании и опытных прошивках отличается не более чем на 2 %.

5. Полученные отличия результатов компьютерного моделирования и опытных прошивок не превышают 18 % и позволяют сделать вывод об эффективности применения ProCAST и QForm для того, чтобы качественно и количественно прогнозировать влияние формы рабочего инструмента на точность размеров получаемых гильз.

Литература/References

1. Erman E. The effect of processing parameters on the propensity for central fracturing in piercing. *J. Appl. Metalwork*. 1987. Vol. 4. No. 4. P. 331–341.
2. Galkin S.P. Radial shear rolling as an optimal technology for lean production. *Steel Trans*. 2014. Vol. 44. No. 1. P. 61–64.
3. Король А.В., Выдрин А.В., Широков В.В. Компьютерное моделирование процесса прошивки в стане винтовой прокатки с бочковидными валками. *Вестн. ЮУГТУ. Сер. Металлургия*. 2015. Т. 15. No. 2. С. 68–74. Korol' A.V., Vydrin A.V., Shirokov V.V. Computer modeling of piercing in a screw mill with barrel-rolling rolls. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gos. univer. Ser. Metallurgiya*. 2015. Vol. 15. No. 2. P. 68–74 (In Russ.).
4. Joun M., Lee J., Cho J., Jeong S., Moon H. Quantitative study on Mannesmann effect in roll piercing of hollow shaft. *Proc. Eng*. 2014. Vol. 81. P. 197–202.
5. Lu L., Wang Z., Wang F., Zhu G., Zhang X. Simulation of tube forming process in Mannesmann mill. *J. Shanghai Jiaotong Univer. (Science)*. 2011. Vol. 16. No. 3. P. 281–285.
6. Pater Z., Kazanecki J. Complex numerical analysis of the tube forming process using Diescher mill. *Archives Metall. Mater*. 2013. Vol. 58. No. 3. P. 717–724.
7. Berazategui D. A., Cavaliere M. A., Montelatici L., Dvorkin E.N. On the modelling of complex 3D bulk metal forming processes via the pseudo-concentrations technique. Application to the simulation of the Mannesmann piercing process. *Int. J. Numer. Methods Eng*. 2006. Vol. 65. No. 7. P. 1113–1144.
8. Yoshida M., Barlat F., Moon Y.H., Lee M.G. 3D FEM simulation of rolling load working on piercer plug in mannesmann piercing process. *AIP Conf. Proc*. Vol. 1252. No. 1. P. 1333–1338.
9. Никулин А.Н. Винтовая прокатка. Напряжения и деформации. М.: Металлургиздат, 2015. Nikulin A.N. Screw rolling. Stress and strain. Moscow: Metallurgizdat, 2015 (In Russ.).
10. Jaouen O., Costes F., Lasne P. A new 3D simulation model for complete chaining casted and forged ingot. In: *Proc. 1-st Int. Conf. on Ingot Casting, Rolling and Forging*. Germany, Aachen: Stahleisen GmBh, 2012. P. 1–9.
11. De Micheli P., Settefrati A., Marie S., Barlier J., Lasne P. Towards the simulation of the whole manufacturing chain processes with FORGE®. In: *Proc. Int. Conf. on New Development in Forging Technology*. Germany, Stuttgart: Inventum GmbH, 2015. P. 1–25.
12. Skripalenko M.M., Bazhenov V.E., Romantsev B.A., Skripalenko M.N., Koltygin A.V., Sidorov A.A. Computer modeling of chain processes in the manufacture of metallurgical products. *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. No. 1-2. P. 86–90.
13. Abdullin A.D., Ershov A.A. End-to-end simulation of casting and metal-forming operations with ProCAST and QForm software. *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. No. 5-6. P. 339–345.
14. Skripalenko M.M., Bazhenov V.E., Romantsev B.A., Skripalenko M.N., Huy T.B., Gladkov Y.A. Mannesmann piercing of ingots by plugs of different shapes. *Mater. Sci. Technol*. 2016. Vol. 32. P. 1712–1720.
15. Баженов В.Е., Колтыгин А.В., Целовальник Ю.В., Санников А.В. Определение коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи для моделирования процесса литья алюминия в графитовые формы. *Изв. вуз. Цвет. металлургия*. 2017. No. 1. С. 40–52. Bazhenov V.E., Koltygin A.V., Tselovalnik Yu.V., Sannikov A.V. Determination of interface heat transfer coefficient between aluminum casting and graphite mold. *Russ. J. Non-Ferr. Met*. 2017. Vol. 58. No. 2. P. 114–123.
16. Баженов В.Е., Колтыгин А.В., Целовальник Ю.В. Определение величины коэффициента теплопередачи между отливкой из сплава АК7ч (А356) и формой из холоднотвердеющей смеси. *Изв. вуз. Цвет. металлургия*. 2016. No. 5. С. 42–51. Bazhenov V.E., Koltygin A.V., Tselovalnik Yu.V. Determination of the heat-transfer coefficient between the AK7ch (A356) alloy casting and no-bake mold. *Russ. J. Non-Ferr. Met*. 2016. Vol. 57. No. 7. P. 686–694.
17. «КванторФорм». URL: <http://qform3d.ru> (дата обращения: 13. 11. 2017). QForm software home page. URL: <http://qform3d.ru> (accessed: 13. 11. 2017) (In Russ.).
18. Modelling of the Mannesmann effect in tube piercing — Padua@Research [Padova Digital Univesirty Archive]. URL: <http://paduaresearch.cab.unipd.it/1552/> (Accessed: 17.11.2017).
19. Lemaitre J., Desmorat R. Engineering damage mechanics. Berlin: Springer, 2005.
20. Lemaitre J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *J. Eng. Mater. Technol*. Vol. 107. No. 1. 1985. P.83–89.
21. Chiluveru S. Computational modeling of crack initiation in crossroll piercing: PhD thesis. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
22. Karpov B.V., Skripalenko M.M., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Samusev S.V., Huy T.B., Pavlov S.A. Studying the nonstationary stages of screw rolling of billets with profiled ends. *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. No. 3-4. P. 257–264.