

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ НА ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЯ АД0

© 2020 г. Ю.В. Гамин, А.Н. Кошмин, А.П. Долбачев, С.П. Галкин, А.С. Алещенко, М.В. Кадач

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 03.02.20 г., доработана 20.04.20 г., подписана в печать 22.04.20 г.

Аннотация: Проведен анализ влияния режимов деформации на условия процесса радиально-сдвиговой прокатки (РСР) алюминия технической чистоты АД0. На основе моделирования методом конечных элементов (МКЭ) получено изменение температуры при различных углах подачи и вытяжках в первом и последнем проходах. Увеличение угла подачи незначительно повышает колебания температуры в поверхностном слое за счет роста частного обжата, но несущественно влияет на общий деформационный разогрев в процессе РСР. Температуру окончания деформации возможно контролировать с помощью варьирования степени обжата. При этом необходимо учитывать исходную температуру нагрева, размеры получаемого конечного проката и вытяжку за проход. Размер заготовки оказывает существенное влияние на тепловые изменения в процессе РСР. В последнем проходе, когда диаметральный размер составляет 20–14 мм, деформационный разогрев практически полностью компенсируется охлаждением прутка при контакте с окружающей средой и инструментом и начинает преобладать с повышением коэффициента вытяжки больше 1,2. Анализ накопленной степени деформации (ϵ_n) при различных режимах деформации показал, что разница значений ϵ_n по поперечному сечению прутка уменьшается при увеличении угла подачи. Сопоставление полученных данных с твердостью и микроструктурой прокатанных образцов АД0 показывает, что величина ϵ_n оказывает значительное влияние на изменение структуры и свойств до определенного значения, что подтверждается полученным распределением микротвердости по поперечному сечению прутков. Механические свойства полученных прутков соответствуют свойствам алюминия технической чистоты в нагартованном состоянии ($\sigma_b \sim 115$ МПа, $\sigma_{0,2} \sim 110$ МПа, $\delta \sim 1\%$, $HV \sim 40-43$).

Ключевые слова: алюминий, радиально-сдвиговая прокатка, моделирование методом конечных элементов, пластическая деформация, угол подачи, коэффициент вытяжки, режимы деформации.

Гамин Ю.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением (ОМД) НИТУ «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: y.gamin@mail.ru.

Кошмин А.Н. – аспирант, инженер кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС». E-mail: koshmin.an@misis.ru.

Долбачев А.П. – аспирант, инженер кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС». E-mail: loiner@list.ru.

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

Алещенко А.С. – канд. техн. наук, зав. кафедрой ОМД, НИТУ «МИСиС». E-mail: judger85@mail.ru.

Кадач М.В. – зав. лабораторией кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС». E-mail: stendek89@yandex.ru.

Для цитирования: Гамин Ю.В., Кошмин А.Н., Долбачев А.П., Галкин С.П., Алещенко А.С., Кадач М.В. Изучение влияния режимов радиально-сдвиговой прокатки на температурно-деформационные условия процесса обработки алюминия АД0. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 5. С. 70–84. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-5-70-83.

Studying the influence of radial-shear rolling on the thermo-deformation conditions of aluminum AA1050 processing

Yu.V. Gamin, A.N. Koshmin, A.P. Dolbachev, S.P. Galkin, A.S. Aleshchenko, M.V. Kadach

National University of Science and Technology (NUST) «MISIS», Moscow

Received 03.02.2020, revised 20.04.2020, accepted for publication 22.04.2020

Abstract: The effect of deformation modes on the process conditions of radial-shear rolling (RSR) of commercial purity aluminum AA1050 is analyzed. Based on finite-element modeling (FEM), temperature variation at various feed angles and elongation in the first and last passes is obtained. An increase in the feed angle slightly raises temperature fluctuations in the surface layer due to increasing reduction per pass, but it does not significantly influence the total deformation heating during RSR. The final deformation temperature can be controlled by varying the reduction ratio. In this case, it is necessary to take into account the initial heating temperature, dimensions of final rolled products and

elongation per pass. The billet size has a significant effect on thermal variations during RSR. In the last pass, when diameters are 20–14 mm, deformation heating is almost completely compensated by rod cooling in contact with the environment and the tool and begins to prevail with an increase in the elongation ratio of more than 1.2. The analysis of equivalent strain (ϵ_e) at various deformation modes showed that the difference in ϵ_e values over the rod cross-section decreases with the increasing feed angle. A comparison of the data obtained with the hardness and microstructure of rolled AA1050 samples shows that ϵ_e has a significant effect on changes in the structure and properties to a certain value. This is confirmed by the obtained microhardness distribution over the cross section of rods. Mechanical properties of obtained rods correspond to the properties of commercial purity aluminum in the work hardened condition ($\sigma_B \sim 115$ MPa, $\sigma_{0.2} \sim 110$ MPa, $\delta \sim 1\%$, $HV \sim 40+43$).

Keywords: aluminium, radial-shear rolling, finite element modelling, plastic deformation, feed angle, elongation ratio, deformation modes.

Gamin Yu.V. – Cand. Sci. (Eng.), associate prof. of the Department of metal forming, National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: y.gamin@mail.ru.

Koshmin A.N. – postgraduate student, engineer of the Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: koshmin.an@misis.ru.

Dolbachev A.P. – postgraduate student, engineer of the Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: loiner@list.ru.

Galkin S.P. – Dr. Sci. (Eng.), prof. of the Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: glk-omd@yandex.ru.

Aleshchenko A.S. – Cand. Sci. (Eng.), head of the Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: judger85@mail.ru.

Kadach M.V. – head of the laboratory of the Department of metal forming, NUST «MISIS». E-mail: stendek89@yandex.ru.

For citation: Gamin Yu.V., Koshmin A.N., Dolbachev A.P., Galkin S.P., Aleshchenko A.S., Kadach M.V. Studying the influence of radial-shear rolling on the thermo-deformation conditions of aluminum AA1050 processing. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 5. P. 70–84 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-5-70-83.

Введение

Алюминий и сплавы на его основе применяются во многих областях промышленности — особое распространение они получили в таких отраслях, как авиастроение, автомобилестроение, машиностроение и приборостроение, что обусловлено набором эксплуатационных свойств, которыми они обладают. Благодаря низкому удельному весу, хорошей обрабатываемости и высокому уровню прочности в сочетании с пластичностью [1–3] алюминий является одним из наиболее перспективных и востребованных среди прочих конструкционных материалов. В промышленности полуфабрикаты из алюминиевых сплавов в виде прутков круглого сечения производят преимущественно способом прессования [4, 5].

Как известно, свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов во многом определяются химическим составом и режимами конечной термической обработки [5]. Режимы термообработки для широко используемых промышленных сплавов на данный момент уже подробно изучены. Кроме этого, механические свойства и структура полуфабрикатов зависят от таких факторов, как химический состав и качество литья исходного слитка, способ и режимы деформационной обработки, напряженно-деформированное состояние (схема деформации) и др. В данном случае перспективным направлением может быть применение способов ОМД, до настоящего момента не используемых для получения полуфабрикатов из алюминиевых

сплавов, или их частичное совмещение с другими способами деформации.

В научной сфере известны такие методы интенсивной пластической деформации (ИПД), как равноканальное угловое прессование (РКУП) [6, 7], аккумулирующая прокатка [8], кручение под высоким давлением (КВД) [9, 10], винтовая экструзия [11, 12], всесторонняя ковка [13]. Результаты многочисленных исследований показывают актуальность и применимость различных способов ИПД для повышения свойств алюминиевых сплавов. Однако основным препятствием для их использования в промышленности остается невозможность получения длинномерных или крупногабаритных изделий. Наряду с другими способами ИПД, направленными на получение материалов с заданной структурой, изучается способ радиально-сдвиговой прокатки (РСП), который является частным случаем винтовой прокатки в трехвалковом стане и отличается большими значениями углов подачи ($\beta \geq 18^\circ$) [14]. Данный способ позволяет получать длинномерные прутки (до 6–9 м) с большими значениями сдвиговых деформаций и высокой точностью геометрических размеров благодаря специальной калибровке валков и точности настройки калибра [15].

В последние годы в научных литературных источниках публикуется много статей, посвященных изучению свойств материалов, полученных способом РСП [16–18]. Существующие исследования особенностей процесса РСП преимуще-

ственно затрагивают обработку сталей [19, 20] и некоторых цветных металлов и сплавов, в основном титановых [21–25] и сплавов магния [26–28]. В работах [29, 30] рассмотрен эффект получения сложно ориентированной градиентной микроструктуры в сечении круглых прутков алюминиевых сплавов в процессе РСП.

В связи с тем, что большинство алюминиевых сплавов имеют характерные особенности формирования структуры и свойств в процессе пластической деформации, актуальной задачей является подробное изучение таких особенностей и параметров, оказывающих на них влияние. Многие Al-сплавы имеют склонность к интенсивному деформационному разогреву, который может вызывать прирост температур, запускающий механизм рекристаллизации. Выбор режимов обжатия заготовки в каждом проходе позволяет контролировать температуру прокатки и обеспечивать требуемое качество полуфабриката. Например, известен способ РСП титановых сплавов, используемых для авиационной промышленности, когда прокатку ведут с ограниченными обжатиями, для того чтобы не превысить температуру полиморфного превращения во время деформации. С другой стороны, степень деформации заготовки должна превышать критическую степень деформации $\epsilon_{кр}$, ниже которой наблюдается резкий рост зерна при рекристаллизации [31].

Величина угла подачи рабочих валков влияет на зону проработки по поперечному сечению прутка, количество циклов деформации в очаге деформации, время прокатки и энергосиловые характеристики процесса. Как показано в [32], угол подачи является эффективным параметром управления процессом пластического формоизменения металла, который при заданном коэффициенте вытяжки контролирует значение интенсивности деформации, вклад сдвиговых и линейных составляющих деформации и их равномерность распределения по поперечному сечению проката. Влияние угла подачи, угла раскатки и коэффициента вытяжки на показатели процесса винтовой

прокатки и качества продукции подробно представлено в [33]. Однако в данных работах рассматривается диапазон изменения угла подачи $\leq 18^\circ$.

Процесс радиально-сдвиговой прокатки характеризуется сложным изменением температурно-скоростных и деформационных параметров в очаге деформации. Их достаточно сложно или, в большинстве случаев, невозможно проанализировать в реальном процессе. Современные программные комплексы для моделирования процессов ОМД, основанные на методе конечных элементов (МКЭ), позволяют значительно упростить некоторые этапы исследований. Функционал таких ПО, как QFORM, DEFORM, Abacus и др., позволяет оценить энергосиловые параметры, напряженно-деформированное состояние в объеме заготовки, изменение температуры, характер формоизменения металла и другие показатели. Многочисленные результаты исследований, представленные в [34–36], показывают перспективность применения компьютерного моделирования для теоретических исследований в области ОМД и инженерных расчетов.

Основной целью данной статьи является анализ влияния режимов деформации на условия процесса радиально-сдвиговой прокатки алюминия АД0 (99,5 мас.% Al). Для лучшего понимания протекания процесса РСП использовано конечно-элементное моделирование.

1. Методы и материалы исследования

1.1. Компьютерное моделирование процесса РСП

Для анализа влияния деформационного режима и конфигурации очага деформации на формирование свойств прутков проводили моделирование процесса РСП в программном комплексе QFORM 9x. Моделирование выполняли для материала AA1050, соответствующего стандарту ISO 209:2009 (аналог АД0 по ГОСТ 4784-97), имеющегося в библиотеке деформируемых материалов программы. Его химический состав представлен в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав АД0, мас. %

Table 1. AD0 chemical composition, wt. %

Al, не менее	Содержание элементов, не более							
	Zn	Mg	Ti	Fe	Zr	Si	Cu	Mn
99,5	0,07	0,05	0,05	0,40	0,21	0,25	0,05	0,05

Описание свойств деформируемых материалов имеет крайне важное значение при проведении конечно-элементного моделирования. В основе работы QFORM заложена математическая модель, описывающая деформацию материала с учетом скоростных и температурных параметров процесса [37]. В программе QFORM сопротивление металла деформации (σ_s , МПа) зависит от степени деформации, скорости деформации и температуры и может быть описано уравнением

$$\sigma_s = f(\epsilon_n, \dot{\epsilon}, t), \quad (1)$$

где ϵ_n — накопленная степень деформации, мм/мм; $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации, c^{-1} ; t — температура, °С.

Реологические свойства и кривые, описывающие сопротивление деформации алюминия АА1050, представлены для диапазона температур 20–250 °С при скоростях деформации 0,01–0,1–1,0–10–100–500 c^{-1} и интервала $t = 300 \div 500$ °С при $\dot{\epsilon} = 0,1–1,0–10–100 c^{-1}$.

В условиях расчета задана совместная модель теплообмена заготовки с инструментом. В таком случае температура инструмента и заготовки изменяется в соответствии с уравнением нестационарной теплопроводности с учетом теплообмена с окружающей средой по свободной поверхности:

$$q_n = b\alpha(T_1 - T_2), \quad (2)$$

где q_n — плотность теплового потока через поверхность теплообмена, Вт/м²; α — коэффициент теплопередачи, Вт/(Км²), комплексно учитывающий коэффициенты теплоотдачи между заготовкой и смазкой и между смазкой и инструментом; T_1 — температура заготовки, К; T_2 — температура инструмента, К; $b = 0,05$ — коэффициент паузы, показывающий, во сколько раз необходимо уменьшить коэффициент теплопередачи при отсутствии плотного контакта между заготовкой и инструментом (без деформации заготовки).

Накопленная степень деформации (ϵ_n) в QFORM определяется через интегрирование по времени скорости деформации вдоль траектории движения частицы:

$$\epsilon_n = \int_{\tau} \dot{\epsilon} d\tau. \quad (3)$$

Трехмерная модель валковой группы и исходной заготовки, созданная в CAD-программе, состоит из валков, развернутых на углы подачи (β) и раскатки (δ) и установленных на минималь-

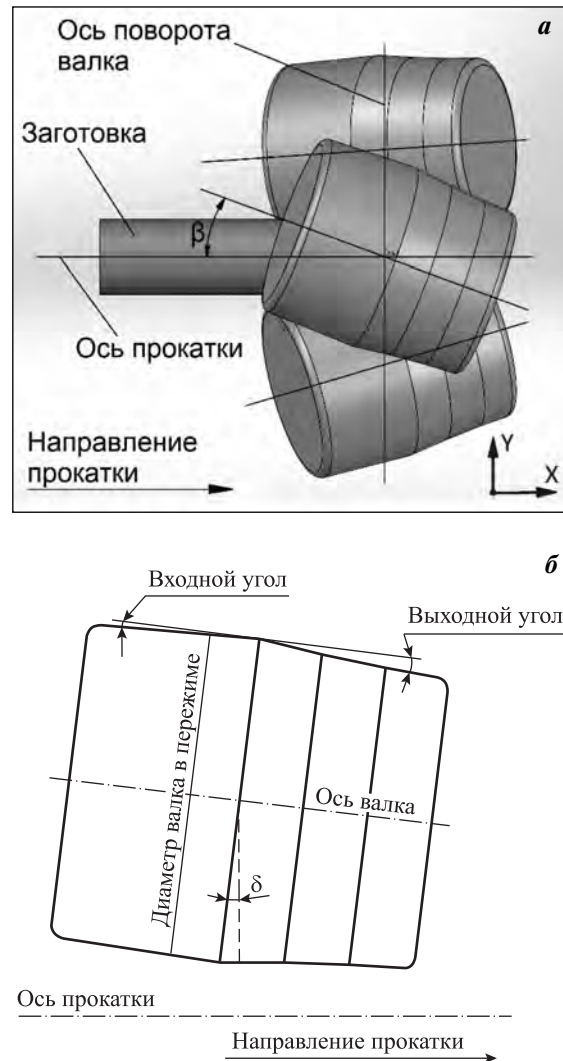


Рис. 1. Трехмерная модель очага деформации (а) и форма рабочего валка стана РСП (б)

Fig. 1. Three-dimensional model of the deformation zone (а) and the shape of the RSR stand working roll (б)

ном расстоянии от оси прокатки, равному радиусу проката, и заготовки заданного диаметра (рис. 1).

В модели применена универсальная калибровка валков, позволяющая прокатывать прутки со свободным выбором количества проходов и коэффициентов вытяжки за проход [15]. Основные параметры модели, использованные при моделировании процесса РСП, были следующие:

Угол раскатки δ , град	–7
Скорость вращения рабочих валков (n), об/мин	30

Материал рабочих валков.....	Сталь 40X
Фактор трения между заготовкой и инструментом (по Зибелю).....	0,93
Температура, °С:	
заготовки	200
инструмента	20
окружающей среды.....	20
Коэффициент теплопередачи (α), Вт/(м ² ·К):	
между материалом заготовки и инструментом.....	30000
между материалом заготовки и окружающей средой.....	30

Фактор трения подбирался исходя из результатов экспериментальных данных таким образом, чтобы машинное время прокатки при моделировании совпадало с реальным временем прокатки.

Моделирование прокатки выполняли, варьируя число проходов ($\Sigma i = 5, 10$) и угол подачи ($\beta = 18, 20, 22, 24$ град). Маршруты прокатки для 5 и 10 проходов приведены в табл. 2.

С целью анализа влияния коэффициента вы-

тяжки за один проход на изменение температурного поля заготовки смоделирована прокатка в первом и последнем проходах с различными коэффициентами вытяжки: $\mu = 1,05; 1,1; 1,2; 1,6; 2,0; 2,4$.

По результатам проведенного моделирования оценивали распределение температуры металла в очаге деформации и количество циклов деформации, анализировали степень накопленной деформации в зависимости от коэффициента вытяжки за проход. Значения перечисленных параметров были получены путем трассировки трех точек: P1 (центр заготовки), P2 (половина радиуса) и P3 (поверхность) — вдоль траектории их движения по очагу деформации.

1.2. Лабораторное исследование

Для экспериментального исследования исходным материалом служил технический алюминий марки АД0. В эксперименте использовали литые слитки диаметром 60 мм и длиной 230 мм. Литые заготовки осуществлялось в графитовую изложницу при скорости охлаждения ~ 10 К/с. Прокатку производили по режимам, аналогичным режимам при выполнении моделирования (см. табл. 2).

Таблица 2

Таблица прокатки при различном числе проходов

Table 2. Table of rolling at different number of passes

Номер прохода, i	Диаметр до прокатки D_{i-1} , мм	Диаметр после прокатки D_i , мм	Коэффициент вытяжки за проход (μ_i)	Суммарный коэффициент вытяжки ($\Sigma \mu_i$)
$\Sigma i = 5$				
1	60	42	2,04	2,04
2	42	31	1,84	3,75
3	31	24	1,67	6,25
4	24	17	1,99	12,46
5	17	14	1,47	18,37
$\Sigma i = 10$				
1	60	50	1,44	1,44
2	50	45	1,23	1,78
3	45	40	1,27	2,25
4	40	35	1,31	2,94
5	35	30	1,36	4,00
6	30	26	1,33	5,33
7	26	22	1,40	7,44
8	22	19	1,34	9,97
9	19	16	1,41	14,06
10	16	14	1,31	18,37

Заготовки перед прокаткой нагревали в камерной электронагревательной печи до температуры $t_0 = 200\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 ч. Прокатку выполняли на опытно-промышленном стане РСП «14-40», имеющем следующие технические характеристики:

Число валков.....	3
Диаметр валков, мм.....	80–98
Угол раскатки (δ), град.....	–7
Угол подачи (β), град.....	20
Частота вращения валков (n), об/мин.....	0–90
Мощность привода, кВт.....	$3 \times 18,5$
Диаметр заготовки, мм.....	20–42
Длина заготовки, мм.....	300–2000
Диаметр проката, мм.....	14–40
Длина проката, мм.....	до 3500

Для проведения металлографических исследований и определения механических свойств от прокатанных прутков отбирали образцы после проходов $i = 1, 3$ и 5 ($i = 2, 6, 10$ при прокатке в 10 проходов). Исследование микроструктуры проводили на оптическом микроскопе «Axio Lab. A1» (Carl Zeiss, Германия). Микротвердость образ-

цов по поперечному сечению измеряли по методу Виккерса (HV) при нагрузке 300 г. После прокатки прутки конечного диаметра 14 мм без предварительной подготовки испытывали на разрыв на универсальной испытательной машине «Zwick Z250» (Zwick Roell, Германия). Эксперименты осуществляли при комнатной температуре со скоростью деформирования 10 мм/мин. По результатам испытаний определяли условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), временное сопротивление (σ_B) и относительное удлинение после разрыва (δ).

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Распределение температуры

Интенсивность и степень протекания процессов формирования структуры в алюминиевых сплавах определяются параметрами деформации, среди которых одним из наиболее важных является температура. Для сплавов, имеющих чувствительность к температурным условиям деформации, целесообразно выполнить анализ изменения температуры в очаге деформации.

На рис. 2 представлены графики изменения температуры в точках P1–P3 в процессе про-

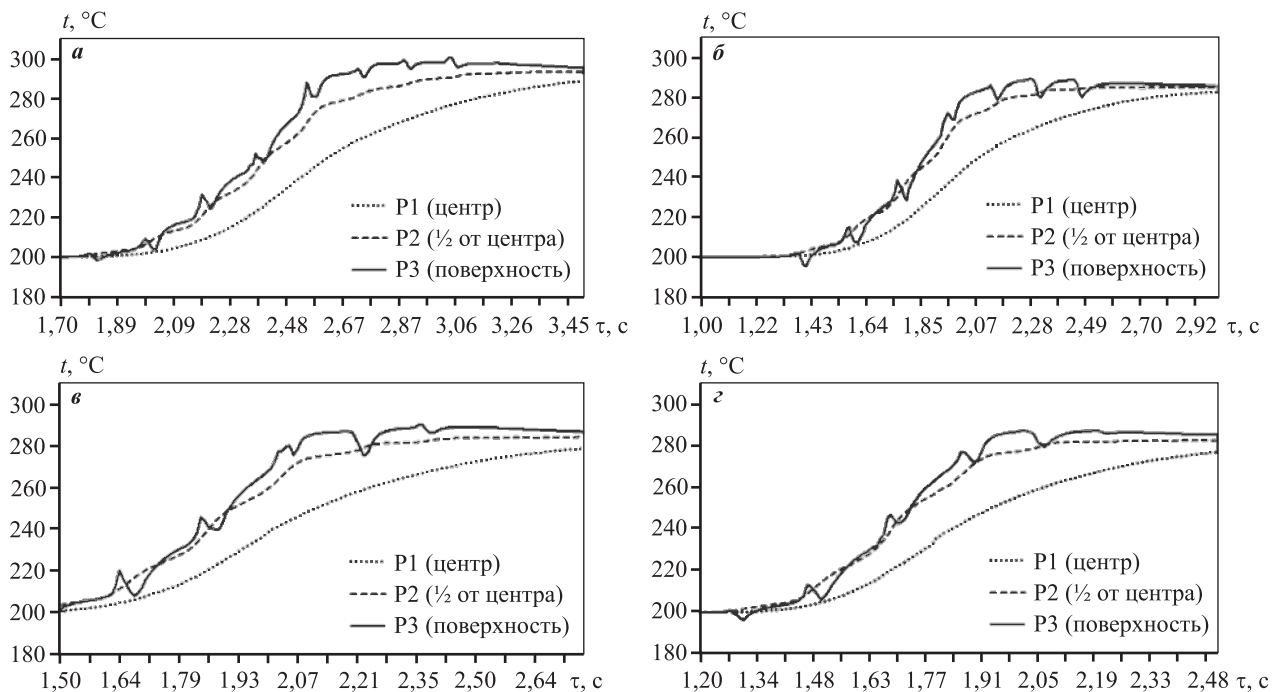


Рис. 2. Изменение температуры по длине очага деформации в зависимости от угла подачи валков

$a - \beta = 18^\circ$ ($N = 9$); $б - \beta = 20^\circ$ ($N = 7$); $в - \beta = 22^\circ$ ($N = 5$); $г - \beta = 24^\circ$ ($N = 5$)

Fig. 2. Temperature variation over the deformation zone length depending on the feed angle of rolls

$a - \beta = 18^\circ$ ($N = 9$); $б - \beta = 20^\circ$ ($N = 7$); $в - \beta = 22^\circ$ ($N = 5$); $г - \beta = 24^\circ$ ($N = 5$)

катки в 1-м проходе с различными углами подачи.

На всех графиках наблюдаются характерные скачки температуры на поверхности в точке Р3, отражающие каждое частное обжатие. Количество этих скачков соответствует суммарному количеству циклов деформации (N) в очаге деформации.

Максимальный рост температуры наблюдается в середине процесса на участке от входа до пережима валка, где частное обжатие максимально. На калибрующем участке температура в точках Р2 и Р3 практически не изменяется, так как обжатие заготовки там минимально. При этом температура центральной части (Р1) продолжает монотонно возрастать и приближаться к температуре поверхности за счет теплопередачи между слоями металла в поперечном сечении. Изменение угла подачи с 18° до 22° при одинаковой калибровке валка сокращает количество циклов деформации с 9 до 5, однако при этом общий прирост температуры снижается на $10\text{--}15^\circ\text{C}$. Увеличение угла подачи незначительно повышает колебания температуры в поверхностном слое за счет роста частного обжатия, но несущественно влияет на общий деформационный разогрев в процессе РСП.

На рис. 3, а представлены графики изменения температуры (Δt) на выходе из очага деформации относительно первоначальной температуры нагрева заготовки (t_0). Величину Δt рассчитывали, как разницу между t_0 и средним значением температуры прутка в точках Р1–Р3.

Изменение температуры для первого и последнего проходов имеет идентичный характер и не зависит от размеров заготовки. При прокатке в последнем проходе с обжатием 5% по диаметру Δt отрицательно, т.е. процесс остывания интенсивнее процесса деформационного разогрева. При обжатии 9,1% отмечается $\Delta t \approx t_0$, а дальнейшее увеличение обжатия приводит к интенсивному разогреву. Для первого прохода изменение температуры во всем диапазоне варьируемых μ положительно, так как поверхность более массивной заготовки остывает медленнее. Стоит отметить, что как в первом, так и в последнем проходе при равномерно изменяющемся μ график изменения Δt представляет собой практически прямую линию.

Графики разницы между максимальной и минимальной температурами ($t_{\max} - t_{\min}$) по сечению прутка (рис. 3, б) для первого и последнего проходов имеют значительные отличия. В первом проходе с ростом μ происходит увеличение разницы тем-

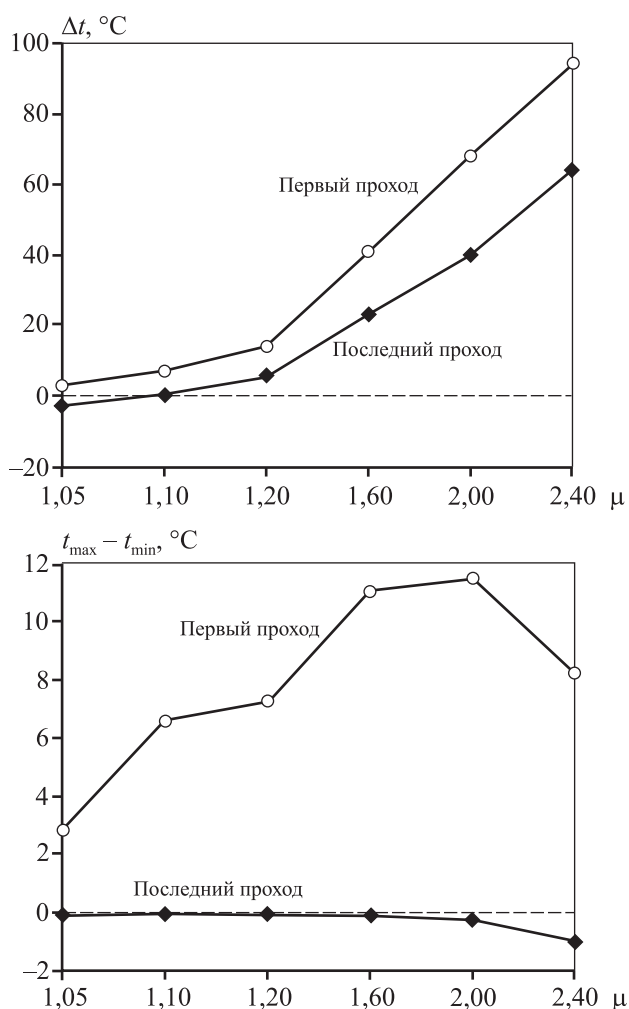


Рис. 3. Изменение средней температуры после прокатки (а) и разницы температур по сечению прутка (б) при различных значениях коэффициента вытяжки (μ)

Fig. 3. Average temperature variation after rolling (a) and temperature difference over the rod cross-section (b) at different elongation ratio (μ) values

ператур между поверхностью и центром, так как с повышением частного обжатия возрастает интенсивность разогрева поверхностных слоев прутка. Однако для $\mu = 2,4$ разница температур снижается, что можно объяснить двумя причинами: во-первых, увеличивается общее время деформации, за которое температура успевает выровняться по сечению прутка; во-вторых, сокращается расстояние между контрольными точками в центре заготовки (Р1) и на поверхности (Р3).

Для последнего прохода в диапазоне $1,05 \leq \mu \leq 2,4$ разница температур между поверхностью и центром практически отсутствует и не превышает 2°C .

Различия в температурных условиях обработки алюминия и сплавов на его основе могут приводить к заметной разнице в структуре и свойствах конечных полуфабрикатов, поэтому должны учитываться при разработке режимов деформации.

Как видно, размер заготовки оказывает существенное влияние на тепловые изменения в процессе РСП. В последнем проходе, когда диаметральные размеры составляют 20–14 мм, деформационный разогрев практически полностью компенсируется охлаждением прутка при контакте с окружающей средой и инструментом и начинает преобладать с повышением коэффициента вытяжки в области $\mu > 1,2$.

Компьютерное моделирование позволяет достаточно подробно проанализировать изменение температуры в процессе РСП и получить зависимости от режимов обжатия. Имея данные о физико-механических свойствах материала, возможно с достаточной точностью заранее определить основные параметры деформации, оказывающие влияние на формирование свойств получаемого полуфабриката.

2.2. Накопленная степень деформации

Как показано в работах [38, 39], на уменьшение размера зерна при интенсивной пластической деформации в определенной степени влияет компонента сдвиговой деформации и накопленная степень деформации (ϵ_n). Проведен анализ накопленной степени деформации по сечению прутка в зависимости от угла подачи рабочих валков и количества проходов.

Наибольшая разница между значениями накопленной степени деформации по поперечному сечению зафиксирована для угла подачи 18° (рис. 4). В диапазоне $20 \leq \beta \leq 24$ град изменение ϵ_n незначительно и в основном наблюдается на поверхности. При одинаковой калибровке валка увеличение угла подачи с 18 до 24 град сокращает длину очага деформации и количество циклов деформации, что приводит к снижению ϵ_n в поверхностном слое с $24,58$ до $19,64$ (для D_5). Стоит отметить, что при этом значение ϵ_n в центре прутка остается практически неизменным и составляет для конечного диаметра $5,6$ – $6,8$.

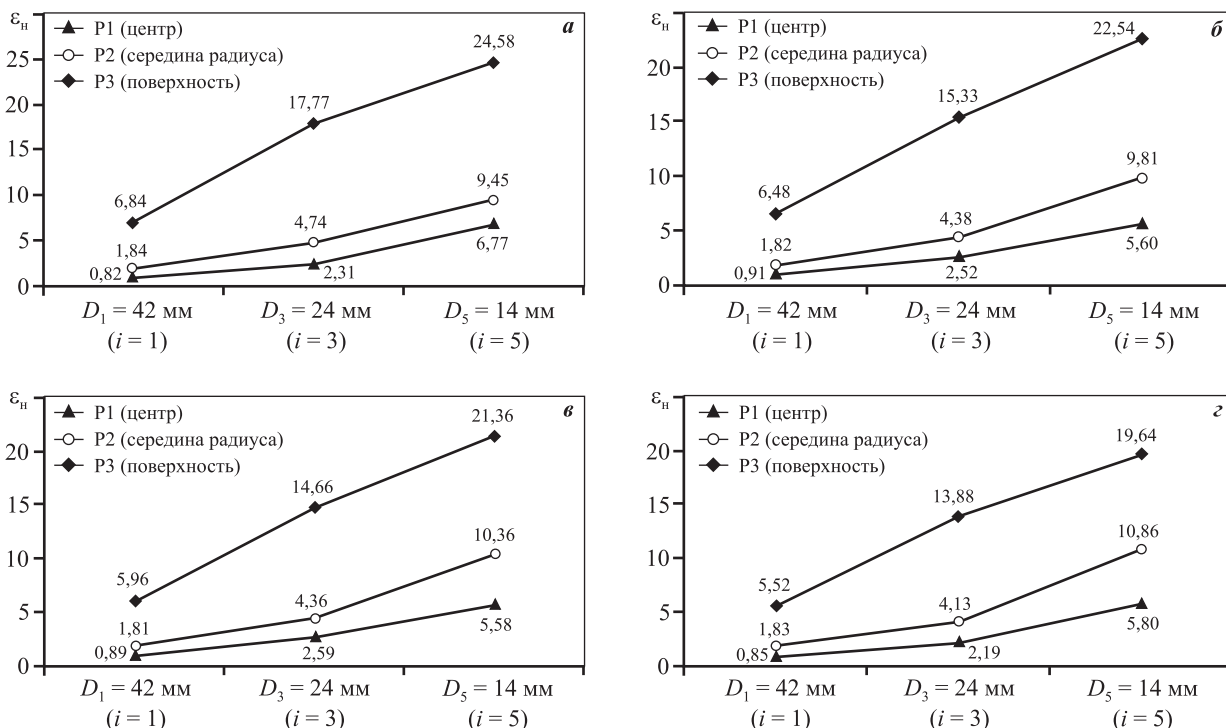


Рис. 4. Накопленная степень деформации по поперечному сечению прутка в зависимости от угла подачи
 а – $\beta = 18^\circ$ ($N = 9$); б – 20° ($N = 7$); в – 22° ($N = 5$); г – 24° ($N = 5$)

Fig. 4. Cumulative deformation over the rod cross-section depending on the feed angle
 а – $\beta = 18^\circ$ ($N = 9$); б – 20° ($N = 7$); в – 22° ($N = 5$); г – 24° ($N = 5$)

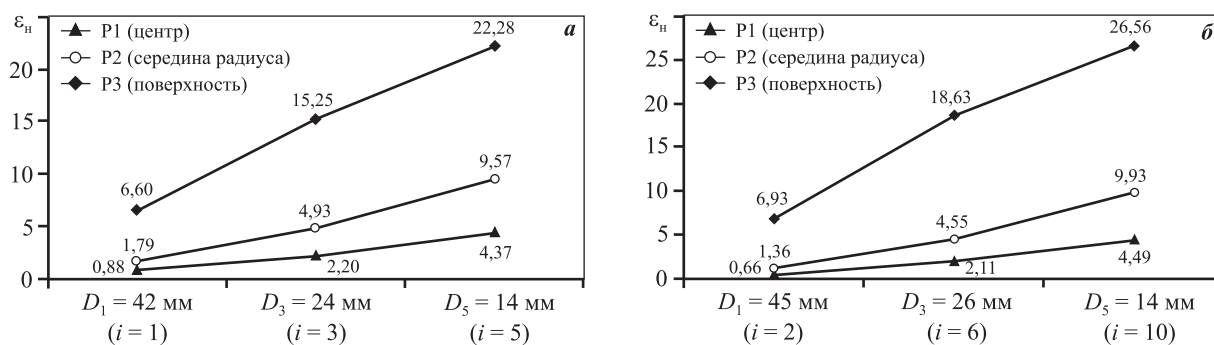


Рис. 5. Накопленная степень деформации по поперечному сечению прутка в зависимости от маршрута прокатки *a* – $\Sigma i = 5$; *б* – $\Sigma i = 10$

Fig. 5. Cumulative deformation over the rod cross-section depending on the rolling route *a* – $\Sigma i = 5$; *б* – $\Sigma i = 10$

С ростом угла подачи $\beta > 18^\circ$ зона интенсивной сдвиговой деформации развивается от поверхностного слоя к центру прутка, что способствует проникновению пластической деформации и снижению неравномерности деформации. С другой стороны, при этом возрастают усилия прокатки. Как показали результаты моделирования, изменение угла подачи с 18 до 24 град не оказывает существенного влияния на величину пластической деформации во внутренних слоях металла (точки P1 и P2), поэтому с точки зрения перспектив промышленного применения способа РСП для алюминиевых сплавов рациональным может быть прокатка при $\beta = 18 \div 20$ град.

На рис. 5 представлены графики изменения ϵ_n в зависимости от маршрута прокатки.

С ростом количества проходов увеличивается суммарное число циклов деформации, поэтому значение ϵ_n в поверхностном слое повышается. Однако, как видно из графиков рис. 5, увеличение Σi не влияет на накопленную степень деформации в центре и на расстоянии $1/2$ радиуса.

В соответствии с предложенной Н. Hallberg [39, 40] моделью непрерывной динамической рекристаллизации накопленная степень деформации (в иностранных источниках данный параметр обозначен как effective strain) оказывает значительное влияние на размер зерна до определенного предельного значения, после чего увеличение ϵ_n практически не сказывается на среднем его размере. Это также подтверждается измерениями микротвердости по поперечному сечению прокатанных образцов, представленными далее. Такие же результаты получены авторами [41] применительно к медному сплаву. Поэтому с точки зрения

получения требуемых свойств и технологичности процесса объективно важны деформация по режимам, обеспечивающим достижение предельного значения ϵ_n в центре полуфабриката, и при этом наименьший градиент этого значения по поперечному сечению.

2.3. Результаты экспериментальных исследований

На рис. 6 показано распределение микротвердости по поперечному сечению прутков, полученное с разным количеством проходов ($\Sigma i = 5$ и 10), но при одинаковой суммарной вытяжке $\Sigma \mu = 18,37$. Образцы имеют одинаковый характер изменения микротвердости. Максимальные значения наблюдаются в центре и на поверхности прутков. Минимальные значения твердости зафиксированы на расстоянии 1,5–3,0 мм от центра прутка.

В обоих случаях после достижения суммарного обжатия 80 % ($\mu \geq 5$) твердость образцов больше не увеличивалась.

Максимальное значение микротвердости на поверхности прутков конечного диаметра 14 мм примерно одинаково и составляет 40–43 HV. Однако с ростом количества проходов с 5 до 10 наблюдается более равномерное распределение твердости по поперечному сечению прутка. Вероятно, это объясняется более равномерным распределением температуры по сечению прутка при небольших обжатиях.

Как показали результаты испытаний (табл. 3), механические свойства полученных образцов соответствуют свойствам наклепанного алюминия технической чистоты. Для всех прутков конечного диаметра характерны высокие пока-

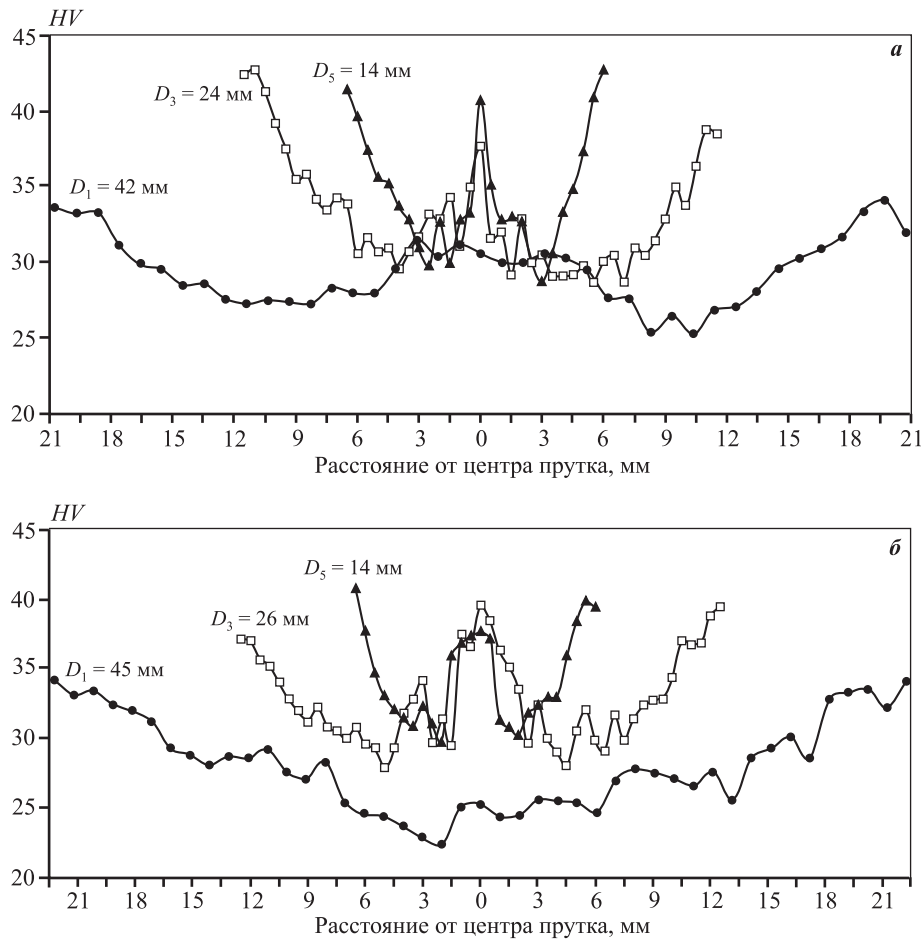


Рис. 6. Распределение микротвердости по поперечному сечению образцов при прокатке в 5 проходов (а) и 10 проходов (б)

Fig. 6. Microhardness distribution over the cross-section of samples at rolling in 5 passes (a) and 10 passes (b)

Таблица 3
Механические свойства прутков ($\varnothing 14$ мм)
из алюминия АД0 (99,5 % Al)
после РСП

Table 3. Mechanical properties of rods ($\varnothing 14$ mm)
of AD0 aluminum (99.5 % Al) after RSR

Режим прокатки			$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
t , °C	n , об/мин	Σi			
200	30	10	103	115	0,6
			105	114	0,9
			113	116	0,7
200	30	5	107	114	0,5
			110	115	0,4
			108	115	0,5

затели прочности при снижении пластичности до 1 %.

Полученные свойства свидетельствуют о том, что температура нагрева перед прокаткой и коэффициент вытяжки за проход недостаточны для протекания динамической рекристаллизации и формирования соответствующей структуры. Это предположение хорошо согласуется с данными компьютерного моделирования (рис. 3). Температура рекристаллизации технического алюминия составляет $t_{\text{рекр}} = 250$ °C [5], следовательно, при нагреве заготовки до 200 °C для начала процесса динамической рекристаллизации температура деформационного разогрева должна превышать 50 °C, что возможно только в первых проходах. В результате вначале при деформации формируется поверхностный слой, состоящий из мелких рекристаллизованных зерен, который сохраняется и

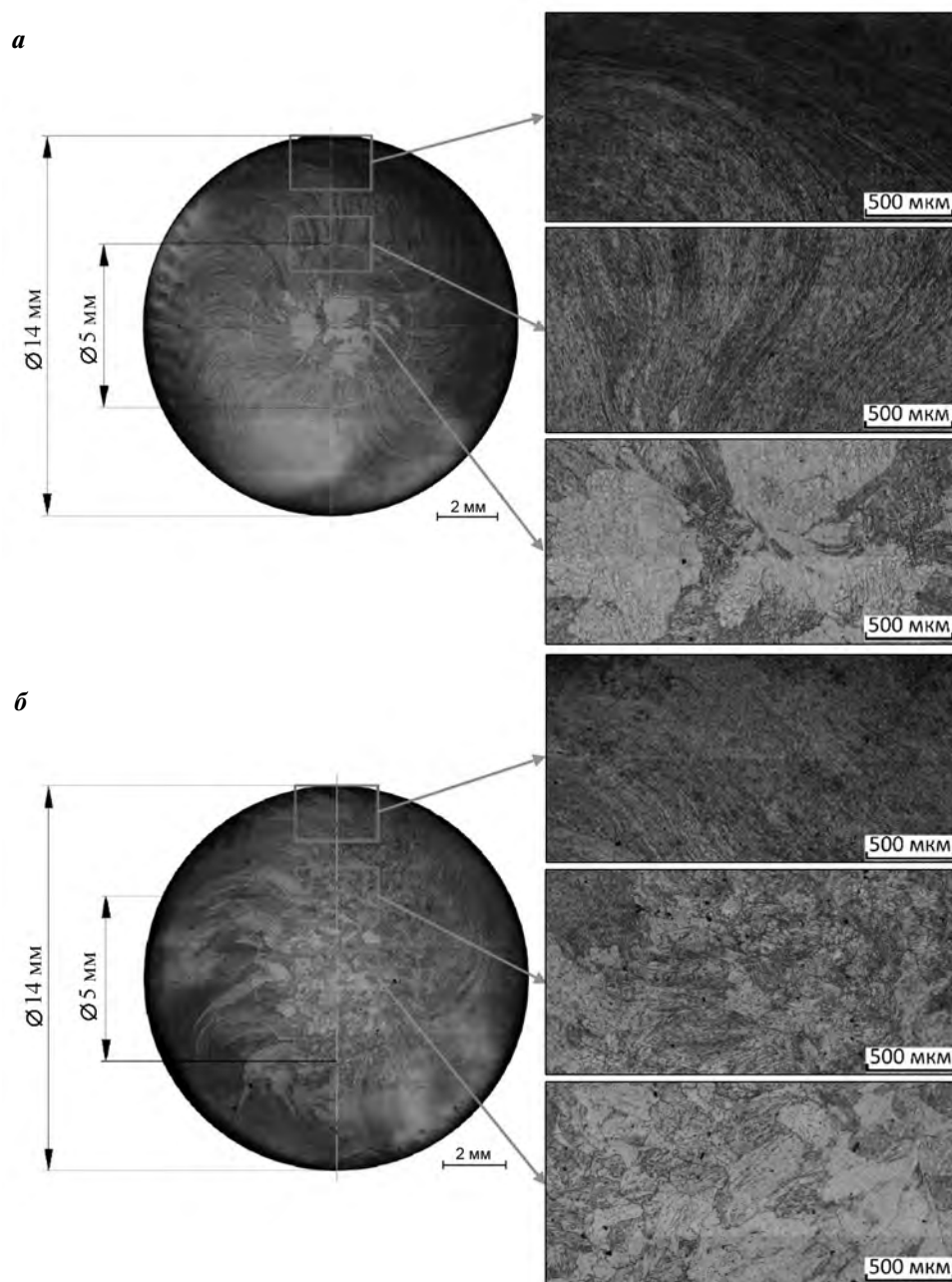


Рис. 7. Микроструктура прутков из алюминия АД0 после РСР при прокатке в 5 (а) и 10 (б) проходов
Fig. 7. Microstructure of AD0 aluminum rods after RSR at rolling in 5 passes (a) and 10 passes (b)

вытягивается в дальнейшем при следующих проходах. В центральной части прутка сохраняется деформированная структура, которая определяет механические свойства материала.

На рис. 7 представлена микроструктура прутков на поверхности, в центральной зоне и на расстоянии 2,5 мм от центра. Для обоих случаев микроструктура образцов представляет собой характерную структуру после винтовой прокатки — спиралевидные зерна, формирующуюся под дей-

ствием сдвиговых деформаций в очаге деформации. На общем виде образцов видно тонкое темное кольцо на поверхности поперечного сечения, соответствующее структуре рекристаллизованных зерен. В центральной части различимы деформированные зерна, сформированные в процессе литья и последующей прокатки слитков.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований процесса РСР согласуются с результатами компьютерного моделирования в

QFORM, что дает возможность предварительного анализа и выбора деформационных параметров и прогнозирования свойств получаемых прутков.

Выводы

1. Проведен анализ влияния режимов деформации на условия процесса радиально-сдвиговой прокатки алюминия технической чистоты АД0. Показано, что анализ температурно-деформационных параметров на основе моделирования методом конечных элементов позволяет выбрать режимы деформации для получения требуемых свойств.

2. На основе результатов компьютерного моделирования получено изменение температуры при различных углах подачи и обжатиях в первом и последнем проходах. Изменение угла подачи с 18° до 22° при одинаковой калибровке валка сокращает количество циклов деформации, однако при этом общий прирост температуры снижается на $10\text{—}15^\circ\text{C}$. Увеличение угла подачи незначительно повышает колебания температуры в поверхностном слое за счет роста частного обжатия, но несущественно влияет на общий деформационный разогрев в процессе РСП.

3. Показано, что температуру окончания деформации возможно контролировать с помощью варьирования степени обжатия. При этом необходимо учитывать исходную температуру нагрева, размеры получаемого конечного проката и величину обжатия за проход. Как в первом, так и в последнем проходах при равномерно изменяющемся показателе μ график изменения температуры (Δt) представляет собой практически прямую линию.

4. Анализ накопленной степени деформации при различных режимах деформации показал, что разница значений ϵ_n по поперечному сечению прутка уменьшается при увеличении угла подачи, в первую очередь, за счет снижения в поверхностном слое, что связано с уменьшением циклов деформации. При этом изменение угла подачи или количества проходов практически не оказывает влияния на значение накопленной степени деформации в центральной зоне прутка. Сопоставление полученных данных с твердостью и микроструктурой прокатанных образцов из алюминия АД0 свидетельствует, что накопленная степень деформации оказывает значительное влияние на изменение структуры и свойств до определенного значения.

5. Для прутков конечного диаметра 14 мм, прокатанных за 5 и 10 проходов, максимальное значение микротвердости зафиксировано на поверхности и составляет $40\text{—}43\text{ HV}$. С увеличением количества проходов наблюдается более равномерное распределение твердости по поперечному сечению прутка. В обоих случаях после достижения суммарного обжатия 80% ($\mu \geq 5$) твердость образцов не повышается.

6. Механические свойства полученных прутков соответствуют свойствам алюминия технической чистоты в наклепанном состоянии ($\sigma_B \sim 115\text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} \sim 110\text{ МПа}$; $\delta \sim 1\%$). При прокатке с обжатием, которое приводит к увеличению в приповерхностном слое температуры выше $t_{\text{рекр}}$, в прутке формируется поверхностный слой, состоящий из мелких рекристаллизованных зерен, который сохраняется и вытягивается в дальнейшем при следующих проходах. В центральной части прутка сохраняется деформированная структура, которая определяет механические свойства материала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00054).

Авторы выражают благодарность сотрудникам научно-производственной базы кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» за помощь в проведении экспериментальных исследований, а также научному сотруднику кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» канд. техн. наук Т.К. Акопяну за помощь в обработке результатов металлографического исследования и механических испытаний.

Acknowledgements: *The research was funded by the Russian Science Foundation grant (Project № 19-79-00054).*

The authors thank fellows of the Research and Manufacturing Facility of the Department of metal forming NUST «MISIS» for assistance in experimental studies, as well as T.K. Akopyan, PhD in Engineering, research fellow of the Department of metal forming NUST «MISIS», for assistance in processing metallographic examination and mechanical test results.

Литература/References

1. *Totten G.E., MacKenzie D.S.* Handbook of aluminium. Vol. 1. Physical metallurgy and processes. N.Y.: Marcel Dekker Inc., 2003.
2. *Белецкий В.М., Кривов Г.А.* Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение): Справочник. Киев: КОМИНТЕХ, 2005.
Beletskii V.M., Krivov G.A. Aluminum alloys (Composition, properties, technology, application): Handbook. Kiev: KOMINTEKh, 2005.
3. *Williams J.C., Starke E.A.* Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Mater.* 2003. Vol. 51.

- №. 19. P. 5775—5799. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.08.023>.
4. Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1984.
Alieva S.G., Al'tman M.B., Ambartsumyan S.M. et al. Industrial aluminum alloys: Handbook. Moscow: Metallurgiya, 1984 (In Russ.).
 5. Арчакова З.Н., Балахонцев Г.А., Басова И.Г. и др. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: Справочник. М.: Металлургия, 1984.
Archakova Z.N., Balakhontsev G.A., Basova I.G. et al. Structure and properties of semi-finished aluminum alloys products: Handbook. Moscow: Metallurgiya, 1984 (In Russ.).
 6. Kliuga A.M., Sordi V.L., De Vincentis N.S., Bolmaro R.E., Schell N., Brokmeier H.-G. Severe plastic deformation by equal channel angular pressing and rolling: the influence of the deformation path on strain distribution. *Adv. Eng. Mater.* 2018. Vol. 20. No. 4. Paper 1700055. <https://doi.org/10.1002/adem.201700055>.
 7. Verlinden B., Chen E., Duchêne L., Habraken A.M. Transient yielding during compression tests on ECAP^{ed} AA1050 aluminium. *Mater. Sci. Forum.* 2011. Vols. 667—669. P. 955—960. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.667-669.955>.
 8. 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 Mater.* 1999. Vol. 47. No. 2. P. 579—583. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00365-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00365-6).
 9. Lanjewar H., Naghdy S., Vercruyse F., Kestens L.A.I., Verleysen P. Severe plastically deformed commercially pure aluminum: Substructure, micro-texture and associated mechanical response during uniaxial tension. *Mater. Sci. Eng. A.* 2019. Vol. 764. Paper 138195. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138195>.
 10. Verleysen P., Lanjewar H. Dynamic high pressure torsion: A novel technique for dynamic severe plastic deformation. *J. Mater. Process. Technol.* 2020. Vol. 276. Paper 116393. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116393>.
 11. Vu V.Q., Prokof'eva O., Toth L.S., Usov V., Shkatulyak N., Estrin Y., Kulagin R., Varyukhin V., Beygelzimer Y. Obtaining hexagon-shaped billets of copper with gradient structure by twist extrusion. *Mater. Charact.* 2019. Vol. 153. P. 215—223. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.04.042>.
 12. Faregh S.S.H., Hassani A. Stress and strain distribution in twist extrusion of AA6063 aluminum alloy. *Int. J. Mater. Form.* 2018. Vol. 11. No. 2. P. 175—184. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1340-0>.
 13. Zhu Q.F., Zhao Z.H., Zuo Y.B., Li L., Cui J.Z. The structure evolution of a 99.995 percent high purity aluminum during multi-forging process in room temperature. *Mater. Sci. Forum.* 2014. Vol. 794—796. P. 876—881. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.794-796.876>.
 14. Galkin S.P., Romantsev B.A., Kharitonov E.A. Putting into practice innovative potential in the universal radial-shear rolling process. *CIS Iron Steel Rev.* 2014. No. 9. P. 35—39.
 15. Galkin S.P., Kharitonov E.A., Romanenko V.P. Screw rolling for pipe-blank production. *Steel Trans.* 2009. Vol. 39. No. 8. P. 700—703. <https://doi.org/10.3103/S096709120908018X>.
 16. Valeev I.S., Valeeva A.K., Fazlyakhmetov R.F., Khalikova G.R. Effect of radial-shear rolling on structure of aluminum alloy D16 (Al—4.4Cu—1.6Mg). *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2015. Vol. 6. No. 1. P. 45—48. <https://doi.org/10.1134/S2075113315010153>.
 17. Shurkin P.K., Akopyan T.K., Galkin S.P., Aleshchenko A.S. Effect of radial shear rolling on the structure and mechanical properties of a new-generation high-strength aluminum alloy based on the Al—Zn—Mg—Ni—Fe system. *Metal Sci. Heat Treat.* 2019. Vol. 60. No. 11—12. P. 764—769. <https://doi.org/10.1007/s11041-019-00353-x>.
 18. Stefanik A., Szota P., Mróz S., Bajor T., Dyja H. Properties of the AZ31 magnesium alloy round bars obtained in different rolling processes. *Arch. Metall. Mater.* 2015. Vol. 60. No. 4. P. 3002—3005. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0479>.
 19. Galkin S.P., Romantsev B.A., Ta D.X., Gamin Yu.V. Resource-saving technology for production of round bars from used shaft of rolling railroad stock. *Chernye Metally.* 2018. No. 4. P. 20—27.
 20. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Kaputkina L.M., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Cheverikin V.V. Study of transient and steady-state stages during two-high and three-high screw rolling of a 12Kh18N10T steel workpiece. *Metallurgist.* 2019. Vol. 63. No. 3—4. P. 366—375. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00832-9>.
 21. Karpov B.V., Patrín P.V., Galkin S.P., Kharitonov E.A., Karpov I.B. Radial-shear rolling of titanium alloy VT-8 bars with controlled structure for small diameter ingots (≤ 200 mm). *Metallurgist.* 2018. Vol. 61. No. 9—10. P. 884—890. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0581-6>.
 22. Sheremetyev V., Kudryashova A., Cheverikin V., Korotitskiy A., Galkin S., Prokoshkin S., Brailovski V. Hot radial shear rolling and rotary forging of metastable beta Ti—18Zr—14Nb (at.%) alloy for bone implants: Microstructure, texture and functional properties. *J. Alloy. Compd.* 2019. Vol. 800. P. 320—326. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.041>.
 23. Sheremet'ev V.A., Kudryashova A.A., Dinh X.T., Galkin S.P., Prokoshkin S.D., Brailovskii V. Advanced technology for

- preparing bar from medical grade Ti—Zr—Nb super-elastic alloy based on combination of radial-shear rolling and rotary forging. *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. No. 1—2. P. 51—61. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00793-z>.
24. Lopatin N.V., Salishchev G.A., Galkin S.P. Mathematical modeling of radial-shear rolling of the VT6 titanium alloy under conditions of formation of a globular structure. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2011. Vol. 52. No. 5. P. 442—447. <https://doi.org/10.3103/S1067821211050075>.
 25. Romancev B.A., Goncharuk A.V., Aleshchenko A.S., Gamin Y.V. Production of hollow thick-walled profiles and pipes made of titanium alloys by screw rolling. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 5. P. 522—526. <https://doi.org/10.3103/S1067821215050132>.
 26. Diez M., Kim H.-E., Serebryany V., Dobatkin S., Estrin Y. Improving the mechanical properties of pure magnesium by three-roll planetary milling. *Mater. Sci. Eng. A*. 2014. Vol. 612. P. 287—292. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.061>.
 27. Dobatkin S., Galkin S., Estrin Y., Serebryany V., Diez M., Martynenko N., Lukyanova E., Perezhogin V. Grain refinement, texture, and mechanical properties of a magnesium alloy after radial-shear rolling. *J. Alloy. Compd.* 2019. Vol. 774. P. 969—979. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.065>.
 28. Ding, X.-F., Shuang, Y.-H., Liu, Q.-Z., Zhao, C.-J. New rotary piercing process for an AZ31 magnesium alloy seamless tube. *Mater. Sci. Tech.* (U.K.). 2018. Vol. 34. No. 4. P. 408—418. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1393998>.
 29. Akopyan T.K., Belov N.A., Aleshchenko A.S., Galkin S.P., Gamin Y.V., Gorshenkov M.V., Cheverikin V.V., Shurkin P.K. Formation of the gradient microstructure of a new Al alloy based on the Al—Zn—Mg—Fe—Ni system processed by radial-shear rolling. *Mater. Sci. Eng. A*. 2019. Vol. 746. P. 134—144. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.029>.
 30. Akopyan T.K., Aleshchenko A.S., Belov N.A., Galkin S.P. Effect of radial—shear rolling on the formation of structure and mechanical properties of Al—Ni and Al—Ca aluminum—matrix composite alloys of eutectic type. *Phys. Metal. Metallogr.* 2018. Vol. 119. No. 3. P. 241—250. <https://doi.org/10.1134/S0031918X18010039>.
 31. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. 3-е изд. М.: МИСИС, 2005.
Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. Recrystallization of metals and alloys. 3rd ed. Moscow: MISIS, 2005 (In Russ.).
 32. Fomin A.V., Aleshchenko A.S., Maslennikov I.M., Galkin S.P., Nikulin A.N. Structural and analytical evaluation of the strain intensity and its components during cross-roll piercing at different feed angles. *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. No. 5—6. P. 477—486. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00848-1>.
 33. Kazuyuki N., Kouichi K., Chihiro H. Development and features of rotary reduction mill. *ISIJ Intern.* 1991. Vol. 31. No. 6. P. 620—627. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.31.620>.
 34. Skripalenko M.M., Galkin S.P., Sung H.J., Romantsev B.A., Huy T.B., Skripalenko M.N., Kaputkina L.M., Sidorow A.A. Prediction of potential fracturing during radial-shear rolling of continuously cast copper billets by means of computer simulation. *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. No. 9—10. P. 849—856. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00728-8>.
 35. Deng G.Y., Zhu Q., Tieu K., Zhu H.T., Reid M., Saleh A.A., Su L.H., Ta T.D., Zhang J., Lu C., Wu Q., Sun D.L. Evolution of microstructure, temperature and stress in a high speed steel work roll during hot rolling: Experiment and modeling. *J. Mater. Process. Technol.* 2017. Vol. 240. P. 200—208. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.09.025>.
 36. Zhang Z., Liu D., Yang Y., Zheng Y., Pang Y., Wang J., Wang H. Explorative study of rotary tube piercing process for producing titanium alloy thick-walled tubes with bi-modal microstructure. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2018. Vol. 18. No. 4. P. 1451—1463. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.05.005>.
 37. QuantorForm2019. URL: <https://qform3d.com> (accessed: 26.11.2019).
 38. Zhang Z., Liu D., Yang Y., Wang J., Zheng Y., Zhang F. Microstructure evolution of nickel-based superalloy with periodic thermal parameters during rotary tube piercing process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. Vol. 104. No. 9—12. P. 3991—4006. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04126-x>.
 39. Hallberg H., Wallin M., Ristinmaa M. Modeling of continuous dynamic recrystallization in commercial-purity aluminum. *Mater. Sci. Eng. A*. 2010. Vol. 527. No. 4—5. P. 1126—1134. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.09.043>.
 40. Hallberg H. Influence of process parameters on grain refinement in AA1050 aluminum during cold rolling. *Int. J. Mech. Sci.* 2013. Vol. 66. P. 260—272. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.11.016>.
 41. Wang Y.L., Molotnikov A., Diez M., Lapovok R., Kim H.-E., Wang J.T., Estrin Y. Gradient structure produced by three roll planetary milling: Numerical simulation and microstructural observations. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2015. Vol. 639. P. 165—172. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.04.078>.