

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ ПРОКАТКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Al–Mg–Sc НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2022 г. Ю.В. Гамин¹, С.П. Галкин¹, С.З. Нгуен¹, Т.К. Акопян^{1,2}

¹ Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва, Россия

² Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 18.01.22 г., доработана 14.02.22 г., подписана в печать 15.02.22 г.

Аннотация: Рассмотрены особенности радиально-сдвиговой прокатки (РСП) алюминиевого сплава Al–Mg–Sc. Реализовано моделирование процесса РСП методом конечных элементов в программе «QForm 3D» с варьированием коэффициента вытяжки за проход и скорости прокатки. На основе полученных результатов проведено исследование температурного поля прутка в очаге деформации с учетом цикличности деформации и конфигурации траекторий течения. Установлено, что температурное поле в очаге деформации определяется существенными различиями в геометрии траекторий течения металла в поверхностных слоях и осевой зоне. При варьировании коэффициента вытяжки от 1,6 до 2,4 разогрев происходит неравномерно от центра к поверхности. Наибольшее увеличение температуры происходит для области, которая находится на расстоянии $\sim 0,3R$ от поверхности. Для осевой зоны изменение температуры в очаге деформации происходит плавно и с незначительной разницей по величине (5–10 °C). Наибольшие колебания температуры отмечены на поверхности прутка — это объясняется деформационным разогревом максимальной интенсивности и одновременным контактом с холодным инструментом при каждом цикле деформации. При снижении скорости прокатки наблюдается картина распределения температурного поля прутка в очаге деформации с превышением температуры центральных слоев по сравнению с поверхностью. Из-за длительного времени контакта прутка с валком на поверхности происходят колебания температуры до 40–50 °C при каждом цикле деформации. При увеличении скорости прокатки амплитуда колебаний температуры на поверхности уменьшается, а деформационный разогрев возрастает. Полученные данные о связи управляющих технологических параметров с изменением температурного поля заготовки могут быть полезны при проектировании технологических режимов прокатки.

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

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

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

Нгуен С.З. — аспирант кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС». E-mail: xuandiep0307@gmail.com.

Акопян Т.К. — ст. науч. сотр. кафедры ОМД, НИТУ «МИСиС»; науч. сотр. Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, г. Москва, Ленинский пр-т, 49). E-mail: nemiroffandtor@yandex.ru.

Для цитирования: Гамин Ю.В., Галкин С.П., Нгуен С.З., Акопян Т.К. Анализ температурно-деформационных условий прокатки алюминиевого сплава Al–Mg–Sc на основе моделирования методом конечных элементов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. № 3. С. 57–67. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-3-57-67.

Analysis of temperature-deformation conditions for rolling aluminum alloy Al–Mg–Sc based on FEM modeling

Yu.V. Gamin¹, S.P. Galkin¹, X.D. Nguyen¹, T.K. Akopyan^{1,2}

¹ National University of Science and Technology (NUST) «MISIS», Moscow, Russia

² Institute of Metallurgy and Materials Science n.a. A.A. Baikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Received 18.01.2022, revised 14.02.2022, accepted for publication 15.02.2022

Abstract: The article discusses the features of Al–Mg–Sc aluminum alloy radial shear rolling (RSR). The RSR process was modeled by the finite element method in the QForm 3D program with the variable elongation ratio per pass and rolling speed. The results obtained were

used as a basis for studying the temperature field of the rod in the deformation zone taking into account the cyclic nature of deformation and the configuration of flow paths. It was found that the temperature field in the deformation zone is determined by significant differences in the metal flow path geometry in surface layers and in the axial zone. When the elongation ratio is varied from 1.6 to 2.4, heating occurs inconsistently from the center to the surface. The highest temperature rise occurs for an area that is located $\sim 0.3R$ from the surface. For the axial zone, temperature variation in the deformation zone occurs smoothly and with an insignificant temperature difference of 5–10 °C. Highest temperature fluctuations are observed on the rod surface, and this is explained by deformation heating and simultaneous contact with a cold roll during each deformation cycle. As the rolling speed decreases, a picture of the rod temperature field distribution in the deformation zone is observed with the temperature in central layers exceeding the surface temperature. Due to the long time of the rod contact with the roll, the surface temperature fluctuates up to 40–50 °C at each deformation cycle. As the rolling speed rises, the amplitude of temperature fluctuations on the surface decreases, and deformation heating increases. The data obtained on the relationship between control process parameters and rod temperature field variation can be useful in the design of rolling process modes.

Keywords: aluminium, radial-shear rolling, flow paths, deformation cyclicality, finite element modelling, plastic deformation, elongation ratio, deformation modes.

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

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

Nguyen X.D. – postgraduate student of the Department of metal forming of NUST «MISIS». E-mail: xuandiep0307@gmail.com.

Akopyan T.K. – senior research fellow of the Department of metal forming of NUST «MISIS»; research fellow at the Institute of Metallurgy and Materials Science n.a. A.A. Baikov of the Russian Academy of Sciences (119334, Russia, Moscow, Leninskii pr., 49). E-mail: nemiroffandtor@yandex.ru.

For citation: Gamin Yu.V., Galkin S.P., Nguyen X.D., Akopyan T.K. Analysis of temperature-deformation conditions for rolling aluminum alloy Al–Mg–Sc based on FEM modeling. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 3. P. 57–67 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-3-57-67.

Введение

Алюминий и сплавы на его основе используются во многих областях промышленности благодаря удачному сочетанию их свойств [1–3]. В ракетно-космической отрасли алюминиевые сплавы нашли широкое применение благодаря низкому удельному весу, высокой прочности, отличной коррозионной стойкости. Долгое время традиционным конструкционным материалом для ракет и космических аппаратов был алюминиевый сплав АМгб [4]. Данный сплав изготавливается в виде прутков, плит, профилей и других деформированных полуфабрикатов [2, 5, 6]. Вместе с тем термически неупрочняемый сплав АМгб имеет недостаточно высокую прочность [7, 8]. Интерес к аэрокосмической области и ее значимость для государства предопределяют проведение поисковых исследований по разработке алюминиевых сплавов, обладающих требуемыми свойствами и более высокой прочностью. Многочисленными исследованиями показана перспективность легирования сплавов системы Al–Mg скандием [9–12]. Выделения дисперсных частиц фазы Al_3Sc размером 1–10 нм повышают температуру рекристаллизации и способствуют получению мелкозернистой структуры деформированных полуфабрикатов [4, 13, 14].

Получивший наибольшее распространение сплав марки 01570 изготавливают либо в виде прутков из слитков большого сечения и массы, либо в виде катанных плит. Такие технологии являются негибкими, требуют энергоемкого оборудования и не позволяют получать небольшие партии с широким размерным рядом полуфабрикатов. Для получения небольших партий и быстрого перехода с размера на размер может быть использован способ радиально-сдвиговой прокатки (РСП). Показано, что РСП может успешно применяться практически для любых материалов, в том числе труднодеформируемых [15–18]. Кроме того, благодаря схеме деформации с большими сдвиговыми деформациями в поверхностных слоях прутка, возможно получение градиентной микроструктуры, обеспечивающей повышение механических свойств материала, в особенности пластических [19, 20]. Так, например, для сплава Д16 при определенных режимах деформации получены прутки с одинаковым уровнем прочности, но при этом разной пластичностью, превышающей требования нормативной документации в 2 раза [21].

Для использования способа деформации применительно к новому сплаву необходимо правильно выбрать и рассчитать параметры деформиро-

вания. К основным задачам при проектировании прокатной технологии можно отнести:

- изготовление продукции заданных геометрических размеров, не выходящих за поля допусков;
- получение продукции без дефектов (наружных, внутренних);
- соответствие продукции требованиям нормативной документации по механическим или эксплуатационным свойствам и характеристикам микроструктуры.

В связи с отмеченным выше, при выборе технологических режимов деформации нового сплава актуальным является анализ температурных и деформационных условий, влияющих на качество и свойства проката. При этом определение оптимальных режимов на основе большого количества экспериментов влечет за собой большие временные и материальные издержки, а особенности процесса не позволяют проанализировать параметры, изменяющиеся в очаге деформации. Современные компьютерные программы для моделирования, основанные на методе конечных элементов (МКЭ), позволяют сократить время разработки и на раннем этапе оценить основные технологические параметры. Последние результаты исследований [22–25] подтверждают перспективность применения компьютерного моделирования для теоретических исследований в области ОМД и инженерных расчетов.

Основной целью данной статьи является анализ температурных полей в очаге деформации в процессе радиально-сдвиговой прокатки сплава Al–6Mg–0,3Sc с различными коэффициентами вытяжки и скоростями прокатки.

Методы и материалы исследования

Моделирование процесса РСП проводили в программном комплексе «QForm v9x» для алюминиевого сплава Al–6Mg с добавкой 0,3 % Sc, химический состав которого был следующим, мас. %:

Al.....основа	Fe0,09
Mg6,25	Si0,08
Sc.....0,27	Zn.....0,2
Mn.....0,46	Ti0,03

Точность моделирования методом конечных элементов во многом зависит от определения свойств материала и принятых параметров. Для моделиро-

вания горячей пластической деформации в данной работе были использованы данные, полученные при испытаниях образцов на сжатие на комплексе «Gleeble 3800» (Dynamic System, Inc., США) (рис. 1). Цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 15 мм, вырезанные из исходного слитка, испытывали при температурах 200, 300, 400 °С и скоростях деформации 1, 10 и 20 с^{–1}. Полученные данные добавлены в базу данных «QForm» в виде табличной функции значений, описываемых уравнением

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

где $\bar{\epsilon}$ — накопленная деформация; $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации, с^{–1}; t — температура, °С.

Анализ кривых течения показал, что такое деформационное поведение может быть следствием развития процессов динамического восстановления (полигонизации), а при больших скоростях деформации (10 и 20 с^{–1}) сплав имеет склонность к интенсивному деформационному разогреву, благодаря чему напряжения течения снижаются с ростом степени деформации [26].

Для решения температурной задачи для исходного материала были заданы теплофизические свойства в виде табличной функции в соответствии с [27].

Моделирование прокатки выполнялось в 1 проход с варьированием коэффициента вытяжки за проход (μ) и изменением частоты вращения (n) рабочих валков (скорости прокатки). В результате получено 8 вариантов расчета. Основные параметры моделирования представлены ниже:

Диаметр заготовки (D_0), мм.....42

Температура, °С:

заготовки перед прокаткой (t)..... 400

валков (t_b) 20

окружающей среды ($t_{o,c}$) 20

Угол, град:

конусности очага деформации
на обжимном участке (α_1).....11

подачи (β) 20

раскатки (δ)..... 7

Материал валков Сталь 5ХНМ

Коэффициент вытяжки (μ) 1,2; 1,6; 2,0; 2,4

Частота вращения валков (n),
об/мин 15; 30; 60; 120

Для анализа изменения параметров в очаге деформации создана область точек на краях и по середине длины заготовки (рис. 2).

После завершения расчета в режиме постпроцессора программы выполняется трассировка данных точек вдоль траектории их движения. Для

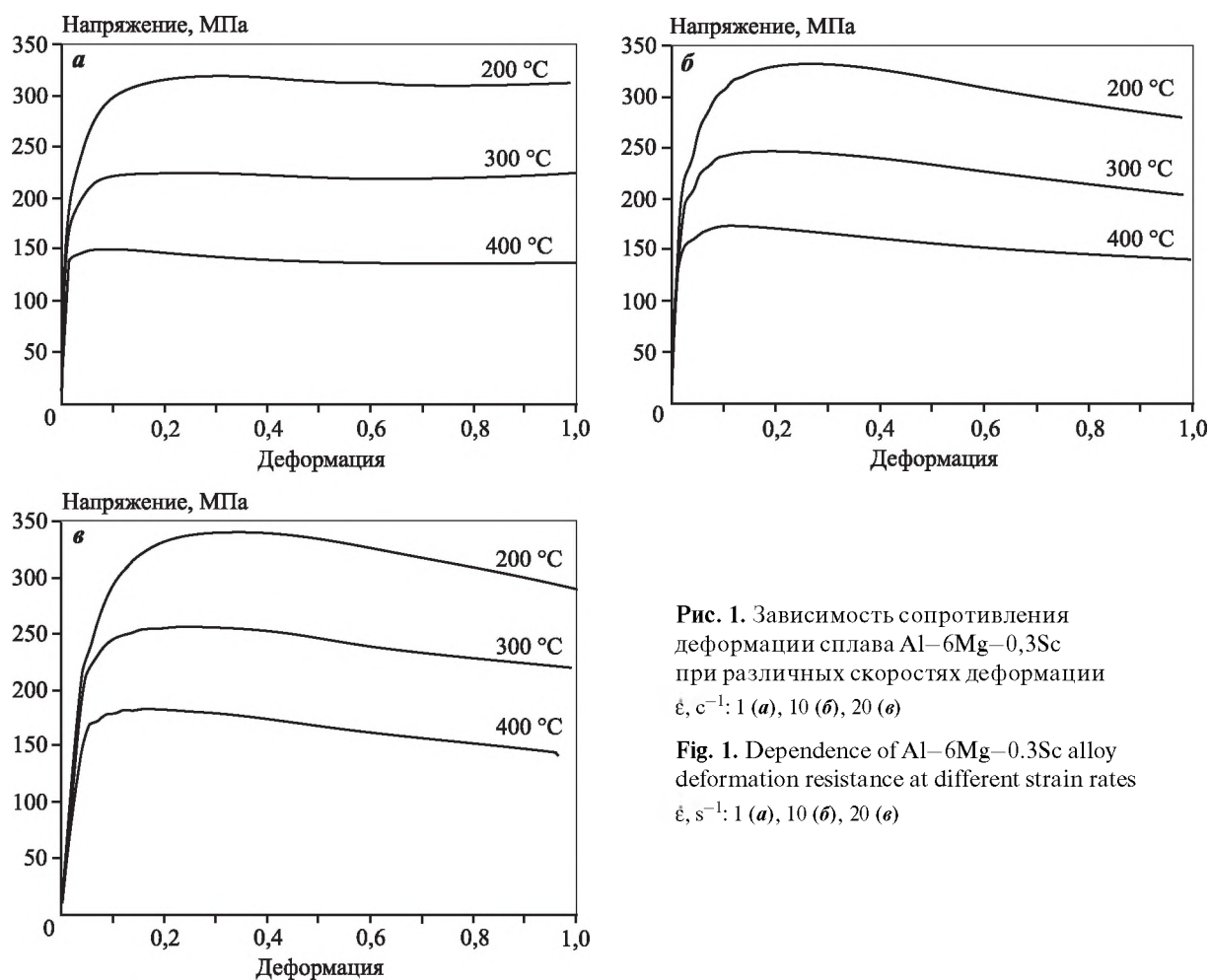


Рис. 1. Зависимость сопротивления деформации сплава Al–6Mg–0,3Sc при различных скоростях деформации $\dot{\epsilon}$, s^{-1} : 1 (*a*), 10 (*b*), 20 (*v*)

Fig. 1. Dependence of Al–6Mg–0.3Sc alloy deformation resistance at different strain rates $\dot{\epsilon}$, s^{-1} : 1 (*a*), 10 (*b*), 20 (*v*)

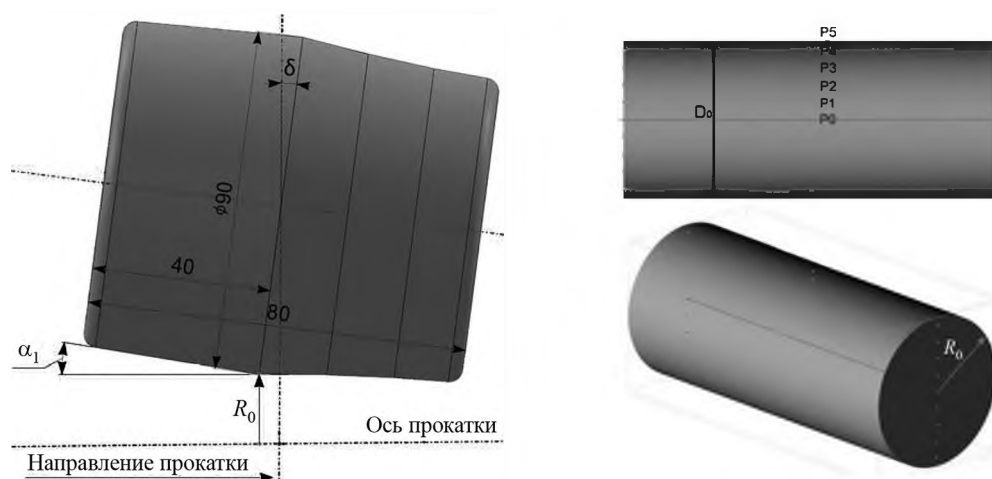


Рис. 2. Калибровка рабочего вала (*a*) и схема положения трассируемых точек (*b*)

Fig. 2. Work roll calibration (*a*) and layout of traced points (*b*)

анализа использованы точки, обозначенные $P0$ — $P5$, где точка $P0$ находится на оси заготовки, а точка $P5$ — на ее наружной поверхности.

По результатам расчета выполнялся анализ распределения температуры и траекторий течения в трассируемых точках.

Результаты и их обсуждение

Траектории течения металла и цикличность процесса

Изучение траекторий истечения деформируемого металла позволяет выявить наиболее общие закономерности конкретного процесса. Траекторный метод особенно информативен и популярен

в исследованиях стационарных процессов ОМД [28–30]. Конечно-элементное моделирование существенно расширяет возможности этого метода, в первую очередь за счет детализации параметров траекторий для произвольной точки и наглядности представления результатов.

На рис. 3 приведены проекции траекторий истечения металла на плоскость, перпендикулярную оси прокатки, для трех точек — $P1$, $P3$ и $P5$.

Периферийная траектория (т. $P5$, рис. 3, *a*) имеет знакопеременную кривизну. Вблизи контакта заготовки с валками образуются вогнутые участки с условно отрицательной кривизной, в зазоре между валками — выпуклые с условно положительной кривизной. Деформация элементарных объемов,

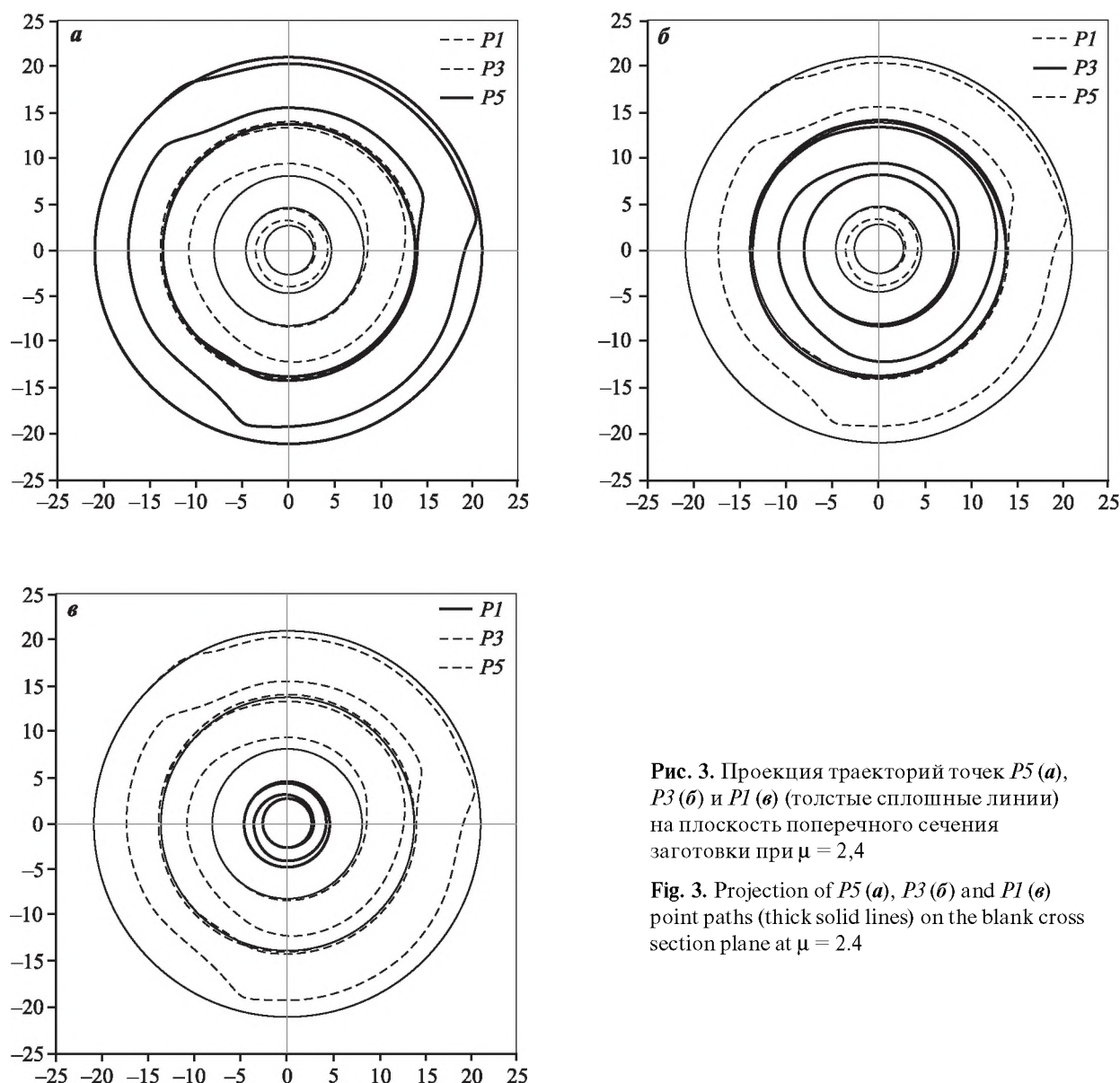


Рис. 3. Проекция траекторий точек $P5$ (*a*), $P3$ (*б*) и $P1$ (*в*) (толстые сплошные линии) на плоскость поперечного сечения заготовки при $\mu = 2,4$

Fig. 3. Projection of $P5$ (*a*), $P3$ (*б*) and $P1$ (*в*) point paths (thick solid lines) on the blank cross section plane at $\mu = 2.4$

совершающих движения по этой траектории, имеет немонотонный, явно выраженный циклический характер.

Проявление элементов цикличности процесса максимально на внешнем контуре и затухает по мере приближения к центру. В промежуточной зоне (т. *P3*, рис. 3, б) имеется определенная немонотонность в изменении радиуса и кривизны траектории при существенно ослабленной цикличности.

В центральной зоне (т. *P1*, рис. 3, в) металл постоянно находится в состоянии непрерывного радиального и окружного сжатия и, соответственно, осевого растяжения. Радиус геликоидальной траектории монотонно уменьшается без изменения знака кривизны. Цикличность деформации практически отсутствует. Деформированное состояние близко к осесимметричному.

Известно [31], и это подтверждается настоящими расчетами, что особенности пластического течения при РСП моделируются выделением двух характерных зон с качественно различными условиями формоизменения. Во внешней зоне развивается знакопеременная радиальная деформация циклического характера. В центральной зоне металл постоянно находится в состоянии равномерного радиального сжатия. Согласно расчетам, величина накопленной степени деформации в центральной зоне определяется текущим значением коэффициента вытяжки μ для всего сечения, практически совпадая с $\ln \mu$, а во внешней зоне она в 8–10 и более раз больше, чем в центральной. Именно с наличием внешней зоны связаны наиболее характерные особенности РСП — такие, как циклический, знакопеременный характер развития деформации, интенсивная проработка структуры с формированием мелкодисперсного строения даже при небольших изменениях габаритных размеров заготовки, существенный и неравномерный деформационный разогрев.

Распределение температуры

На рис. 4 показано изменение температуры металла в контрольных точках по мере прохождения очага деформации. Температурное поле формируется взаимодействием двух разнонаправленных процессов: повышением температуры в результате деформационного разогрева и снижением температуры при контакте металла с относительно холодными валками. Оба процесса имеют существенную неравномерность по объему очага

деформации, достигая максимальной интенсивности в периферийных слоях заготовки и минимальной — в центральных.

В приконтактных слоях отмечается резко выраженная цикличность изменения температуры по ходу движения контрольных точек *P4* и *P5*. В зоне контакта с валками температура падает, в зазоре между валками она возрастает. Максимальный прирост температуры приходится на точку *P4*, которая находится на расстоянии приблизительно 3,5 мм (или $0,3R$) от поверхности. Температура в точке *P5* на поверхности заготовки имеет наибольшую амплитуду колебаний, что связано с резким охлаждающим действием валков на поверхности контакта.

По мере приближения к центру очага деформации (т. *P3–P0*) цикличность изменения температуры затухает, приобретая характер монотонного роста от входа в очаг деформации к выходу.

Увеличение коэффициента вытяжки имеет существенное влияние на результирующий рост температуры сплава Al–6Mg–0,3Sc в процессе прокатки. Наибольший деформационный разогрев образуется на участке обжатия до сечения пережима, а на калибрующем участке температура всех точек стремится к одинаковому значению. При коэффициенте вытяжки $\mu = 1,2$ среднее увеличение температуры прутка на выходе из очага деформации составляет 20°C (рис. 4, а), в то время как для $\mu = 2,4$ разогрев превышает 60°C (рис. 4, з).

Температурное поле в очаге деформации весьма существенно и качественным образом зависит от скорости вращения валков (рис. 5). При высоких значениях $n = 60\div 120$ об/мин температурное поле для каждой из точек *P0–P5* изменяется достаточно монотонно и равномерно. Амплитуда температурных колебаний в наиболее разогретых периферийных слоях минимальна и не превышает 15°C . Из валков выходит прутки, температура поверхности которого на $5\text{–}15^\circ\text{C}$ больше температуры центра.

Для максимальной скорости прокатки (рис. 5, з) на участке обжатия происходит резкий рост температуры по всему сечению прутка (от 20°C в центре до 70°C на поверхности), в результате чего в сечении пережима формируется наибольший перепад температур. После пережима температура поверхности начинает снижаться, а в центральных слоях продолжает расти, приближаясь к одинаковому значению за счет внутренней теплопередачи.

С уменьшением скорости прокатки температурное поле качественно изменяется (рис. 5 а, б).

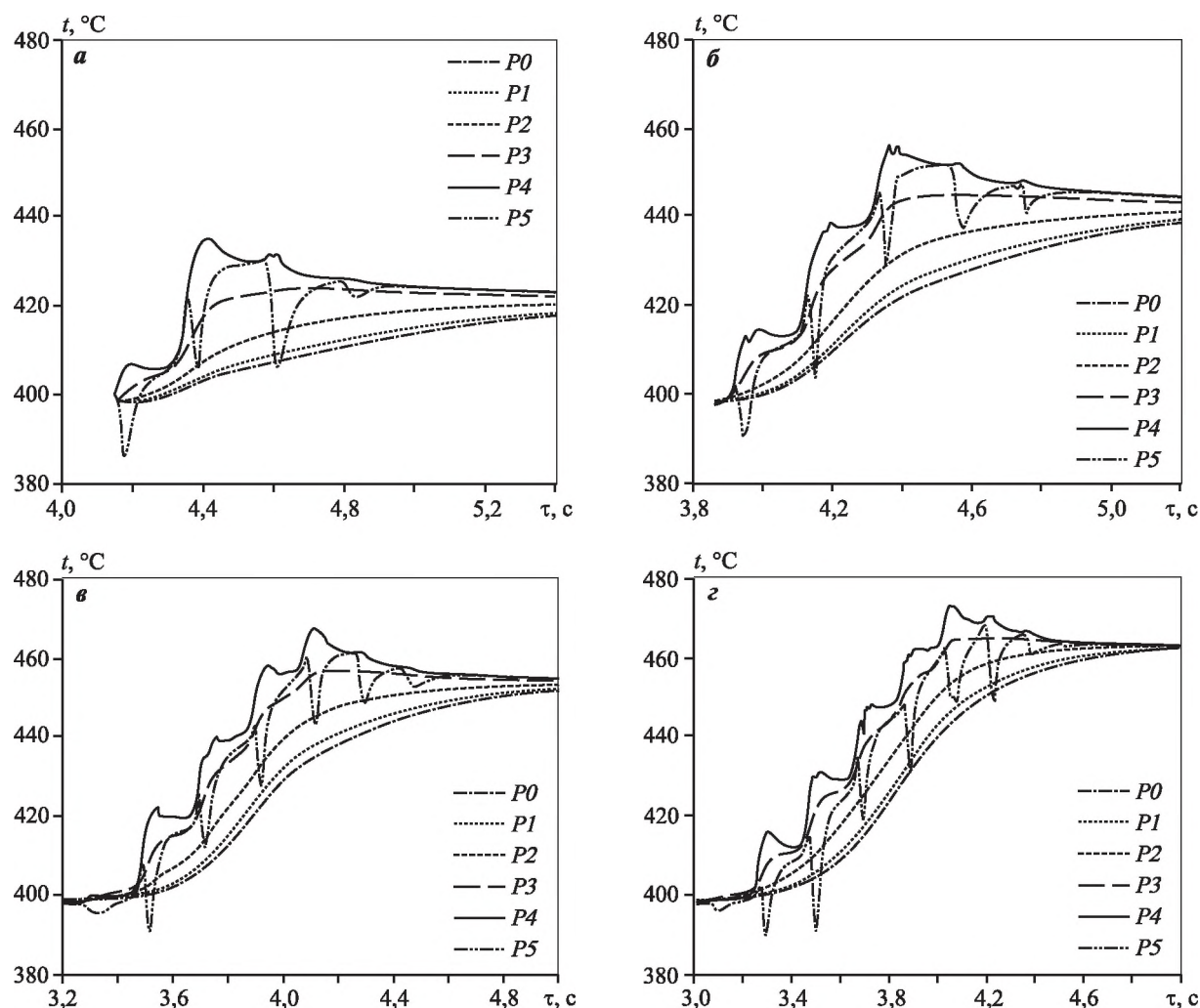


Рис. 4. Распределение температуры в очаге деформации при различных коэффициентах вытяжки $\mu = 1,2$ (а); 1,6 (б); 2,0 (в); 2,4 (г)

Fig. 4. Temperature distribution in deformation zone at different elongation ratios $\mu = 1.2$ (a); 1.6 (б); 2.0 (в); 2.4 (г)

Возрастает время контакта металла с валками, что приводит к усилению их охлаждающего действия, особенно в приповерхностных слоях. Резко повышается неравномерность температурного поля по ходу движения рассматриваемых точек в очаге деформации. Локальное падение температуры для точки $P5$ в зоне контакта увеличивается до 40–50 °С в каждом цикле деформации. Происходит общее снижение температуры наружных слоев. Максимум разогрева смещается в осевую зону очага деформации. Из валков выходит пруток с максимумом температуры на оси и ее минимумом на поверхности, т.е. с температурным перепадом, обратным по отношению к прокатке на высоких оборотах.

Описанные изменения температурного поля прутка в очаге деформации определяются разницей траекторного истечения различных слоев металла при цикличности контактного взаимодействия периферийных слоев металла с валками. Поверхностные слои металла деформируются в условиях резко выраженных колебаний температуры, амплитуда которых зависит от управляемых технологических факторов (температуры и скорости прокатки, режима обжатий, калибровки валка). В центральных слоях температура деформируемого металла монотонно повышается. В совокупности указанные температурно-траекторные особенности процесса РСП оказывают влияние на формирование структуры и свойств проката.

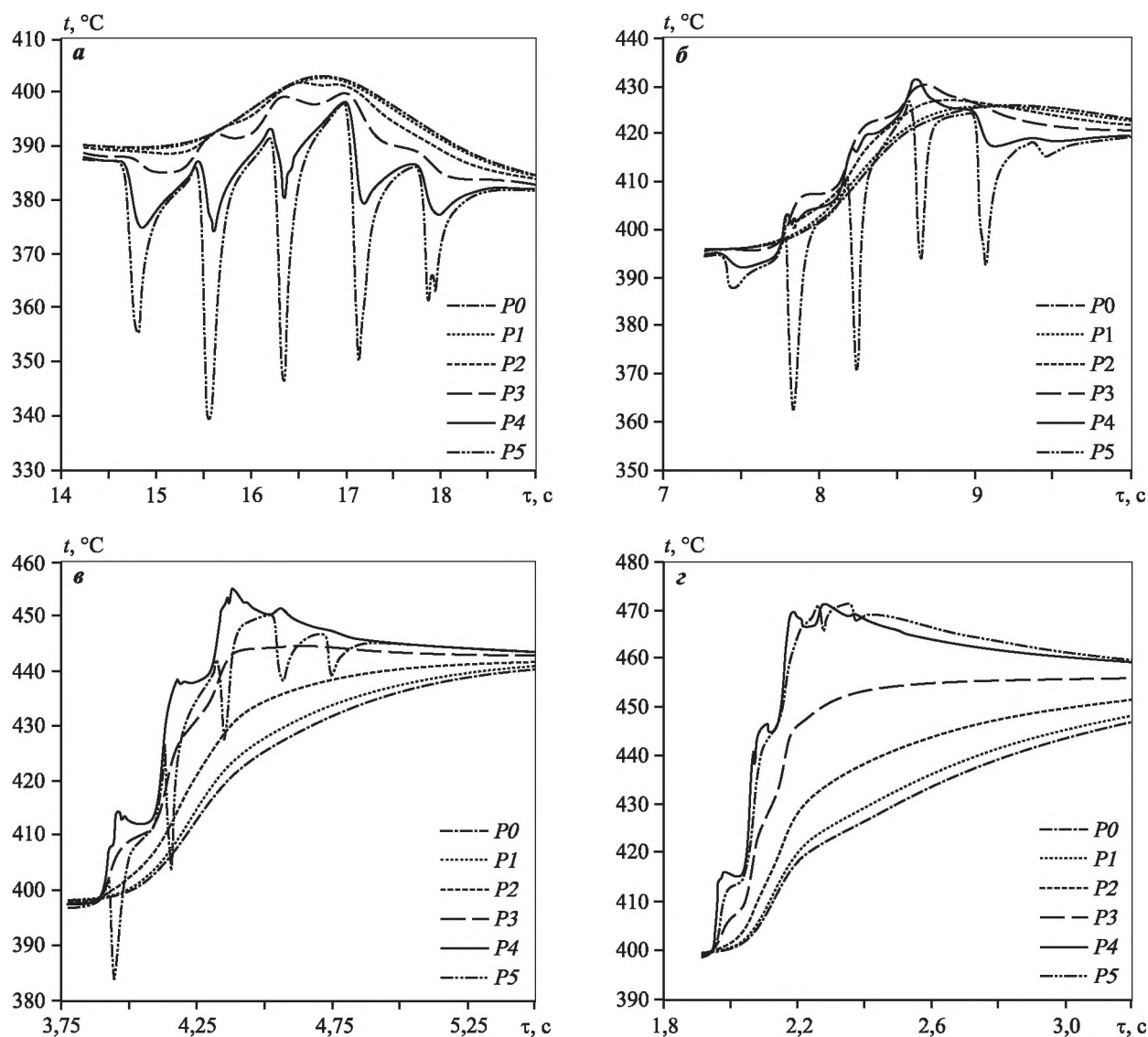


Рис. 5. Распределение температуры в очаге деформации при различной частоте вращения валков
 n , об/мин: 15 (а), 30 (б), 60 (в), 120 (г)

Fig. 5. Temperature distribution in deformation zone at different roll rotation speeds
 n , rpm: 15 (а), 30 (б), 60 (в), 120 (г)

Адекватность полученных результатов можно оценить по количеству циклов деформации на обжимном участке (N_0). Величина N_0 представляет одну из важнейших обобщенных характеристик процесса РСП, которая связывает угол подачи (β), угол конусности очага деформации на обжимном участке (α_1) и коэффициент вытяжки (μ) следующим соотношением [30, 31]:

$$N = (\mu^{3/2} - 1)/C, \quad (2)$$

где $C = 2\pi\tau g\alpha_1\lg\beta$ — постоянная очага деформации.

Для вышеуказанных параметров моделирования $C = 0,44$. Сопоставление результатов модели-

рования и аналитического расчета приведено в таблице.

В целочисленном представлении результаты моделирования и расчета совпадают.

Выявленные в результате анализа изменения температурного поля являются существенными для исследуемого сплава и при определенных условиях могут приводить к формированию структуры различных видов (рекристаллизованной, частично рекристаллизованной, полигонизованной или деформированной). Как было показано в ранее проведенных работах на примере алюминиевых сплавов АД0 и Д16 [21, 32], возможен выбор

Сравнение количества циклов на обжимном участке при моделировании и аналитическом расчете

Comparison of cycle quantities at reduction area during modeling and analytical calculation

Коэффициент вытяжки	Количество циклов деформации на обжимном участке (N_0)	
	Моделирование	Расчет по формуле (2)
1,2	1	0,71
1,6	2	2,33
2,0	4	4,16
2,4	6	6,18

сочетания температурно-деформационных и скоростных условий процесса РСП, который позволит получить микроструктуру, отвечающую наилучшему сочетанию прочности и пластичности материала.

Выводы

1. Проведен анализ температурных и деформационных условий радиально-сдвиговой прокатки сплава Al—6Mg—0,3Sc при варьировании коэффициента вытяжки за проход и скорости прокатки.

2. На основании анализа траекторий истечения деформируемого металла в очаге деформации выявлены и описаны особенности процесса радиально-сдвиговой прокатки и их влияние на параметры формоизменения. Наличие внешней циклической зоны траекторного перемещения металла обуславливает знакопеременный характер развития деформации и формирование наружного мелкодисперсного структурного слоя.

3. Поверхностные слои металла характеризуются цикличностью изменения параметров температуры и напряжений, амплитуда которых зависит от управляемых технологических факторов (температуры и скорости прокатки, режима обжатия, калибровки валка), а центральные слои подвержены монотонному изменению. Выявленные в результате анализа изменения температурного поля являются существенными для исследуемого сплава и при определенных условиях могут приводить к формированию различных видов структуры.

4. Частота вращения валков оказывает существенное влияние на температурное поле деформируемой заготовки с качественным переходом: при низких оборотах (15—30 об/мин) из очага деформации выходит прутки, температура цен-

тральной части которого выше температуры на поверхности. При частоте вращения валков 60—120 об/мин формируется обратный перепад температуры между центром и поверхностью.

5. Выполненные расчеты подтверждаются аналитическим расчетом циклов деформации на обжимном участке. Полученные данные могут быть полезны при проектировании технологии и расчете режимов деформации сплава Al—6Mg—0,3Sc способом РСП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-00144).

Acknowledgments. The research was funded by the Russian Science Foundation grant (Project No. 21-79-00144).

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 (In Russ.).
3. Williams J.C., Starke E.A. Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Mater.* 2003. Vol. 51. No. 19. P. 5775—5799. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.08.023>.
4. Бронз А.В., Ефремов В.И., Плотников А.Д., Чернявский А.Г. Сплав 1570С — материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК «ЭНЕРГИЯ». *Косм. техника и технологии.* 2014. No. 4 (7). С. 62—67.
Bronz A.V., Efremov V.I., Plotnikov A.D., Chernyavskii A.G. Alloy 1570S is a material for sealed structures of promising reusable products of RSC ENERGIA. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii.* 2014. No. 4 (7). P. 62—67 (In Russ.).
5. Hirsch J. Aluminium sheet fabrication and processing. In: *Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications.* Cambridge, UK: Woodhead Publ. Ltd., 2011. P. 719—746. <https://doi.org/10.1533/9780857090256.3.719>
6. Kleiner M., Chatti S., Klaus A. Metal forming techniques for lightweight construction. *J. Mater. Process. Technol.* 2006. Vol 177. No. 1—3. P. 2—7. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.085>.
7. Добаткин С.В., Захаров В.В., Перевезенцев В.Н., Ростова Т.Д., Копылов В.Н., Рааб Г.И. Механические свойства субмикроструктурных сплавов Al—Mg

- (AMg6) и Al—Mg—Sc (01570). *Технол. легких сплавов*. 2010. No. 1. С. 74—84.
- Dobatkin S.V., Zakharov V.V., Perevezentsev V.N., Rostova T.D., Kopylov V.N., Raab G.I. Mechanical properties of submicrocrystalline alloys Al—Mg (AMg6) and Al—Mg—Sc (01570). *Tekhnologiya legkikh splovov*. 2010 No. 1. P. 74—84 (In Russ.).
8. Уазырханова Г.К., Рахадиллов Б.К., Виелеба В.К., Уазырханова Ж.К. Структура и механические свойства алюминиевых сплавов АМц и АМг6 после пластической деформации. *Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика*. 2017. No. 3 (87). С. 38—47.
Uazyrkhanova G.K., Rakhadilov B.K., Vieleba V.K., Uazyrkhanova Zh.K. Structure and mechanical properties of AMts and AMg6 aluminum alloys after plastic deformation. *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Ser. Fizika*. 2017. No. 3 (87). P. 38—47 (In Russ.).
 9. Sitdikov O., Avtokratova E., Sakai T., Tsuzaki K., Kaibyshev R., Watanabe Y. Effect of processing temperature on microstructure development during ECAP of Al—Mg—Sc alloy. *Mater. Sci. Forum*. 2008. Vol. 584—586. P. 481—486. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.584-586.481>.
 10. Sitdikov O., Sakai T., Avtokratova E., Kaibyshev R., Kimura Y., Tsuzaki K. Grain refinement in a commercial Al—Mg—Sc alloy under hot ECAP conditions. *Mater. Sci. Eng. A*. 2007. Vol. 444. No. 1—2. P. 18—30. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.081>.
 11. Филатов Ю.А. Сплавы системы Al—Mg—Sc как особая группа деформируемых алюминиевых сплавов. *Технол. легких сплавов*. 2014. No. 2. С. 34—41.
Filatov Yu.A. Alloys of the Al—Mg—Sc system as a special group of wrought aluminum alloys. *Tekhnologiya legkikh splovov*. 2014. No. 2. P. 34—41 (In Russ.).
 12. Han X., Wang S., Wei B., Pan S., Liao G., Li W. Wei Y. Influence of Sc addition on precipitation behavior and properties of Al—Cu—Mg alloy. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s40195-021-01328-9>.
 13. Buranova Yu., Kulitskiy V., Peterlechner M., Mogucheva A., Kaibyshev R., Divinski S.V., Wilde G. Al₃(Sc,Zr)-based precipitates in Al—Mg alloy: Effect of severe deformation. *Acta Mater*. 2017. Vol. 124. P. 210—224. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.10.064>.
 14. Lathabai S., Lloyd P.G. The effect of scandium on the microstructure, mechanical properties and weldability of a cast Al—Mg alloy. *Acta Mater*. 2002. Vol. 50. No. 17. P. 4275—4292. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00259-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00259-8).
 15. Arbuz A., Kawalek A., Ozhmegov K., Dyja H., Panin E., Lepsibayev A., Sultanbekov S., Shamenova R. Using of radial-shear rolling to improve the structure and radiation resistance of zirconium-based alloys. *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 19. Paper 4306. <https://doi.org/10.3390/ma13194306>.
 16. Патрин П.В., Карпов Б.В., Алешенко А.С., Галкин С.П. Оценка технологических возможностей радиально-сдвиговой прокатки сортового проката из жаропрочного сплава ХН73МБТЮ. *Сталь*. 2020. No. 1. С. 18—21.
Patrin P.V., Karpov B.V., Aleshchenko A.S., Galkin S.P. Capability process assessment of radial-displacement rolling of heat-resistant alloy HN73MBTYU. *Steel Transl.* 2020. Vol. 50. No. 1. P. 42—45 (In Russ.).
 17. 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 superelastic alloy based on combination of radial-shear rolling and rotary forging. *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. P. 51—61. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00793-z>.
 18. Stefanik A., Szota P., Mróz S. Analysis of the effect of rolling speed on the capability to produce bimodal-structure AZ31 alloy bars in the three-high skew rolling mill. *Arch. Metall. Mater*. 2020. Vol. 65. No. 1. P. 329—335. <https://doi.org/10.24425/amm.2020.131734>.
 19. Galkin S.P., Aleschenko A.S., Romantsev B.A., Gamin Yu.V., Iskhakov R.V. Effect of preliminary deformation of continuously cast billets by radial-shear rolling on the structure and properties of hot-rolled chromium-containing steel pipes. *Metallurgist*. 2021. Vol. 65. P. 185—195. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01147-4>.
 20. Lezhnev S.N., Naizabekov A.B., Panin E.A., Volokitina I.E., Arbuz A.S. Graded microstructure preparation in austenitic stainless steel during radial-shear rolling. *Metallurgist*. 2021. Vol. 64. P. 1150—1159. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01100-5>.
 21. Gamin Y.V., Galkin S.P., Romantsev B.A., Koshmin A.N., Goncharuk A.V., Kadach M.V. Influence of radial-shear rolling conditions on the metal consumption rate and properties of D16 aluminum alloy rods. *Metallurgist*. 2021. Vol. 65. P. 650—659. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01202-0>.
 22. Koshmin A.N., Zinoviev A.V., Chasnikov A.Y., Grachev G.N. Investigation of the stress-strain state and microstructure transformation of electrotechnical copper buses in the deformation zone during continuous extrusion. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2021. No. 62. P. 179—189. <https://doi.org/10.3103/S1067821221020085>.
 23. Xuan T.D., Sheremetyev V.A., Komarov V.S., Kudryashova A.A., Galkin S.P., Andreev V.A., Prokoshkin S.D., Brailovski V. Comparative study of superelastic Ti—Zr—Nb and commercial VT6 alloy billets by QForm simulation.

- Russ. J. Non-ferr. Met.* 2021. No. 62. P. 39—47. <https://doi.org/10.3103/S1067821221010168>.
24. Aleshchenko A.S., Budnikov A.S., Kharitonov E.A. Metal forming study during pipe reduction on three-high rolling mills. *Steel Transl.* 2019. Vol. 49. P. 661—666. <https://doi.org/10.3103/S0967091219100024>.
 25. Akopyan T.K., Gamin Y.V., Galkin S.P., Prosviryakov A.S., Aleshchenko A.S., Noshin M.A., Koshmin A.N., Fomin A.V. Radial-shear rolling of high-strength aluminum alloys: Finite element simulation and analysis of microstructure and mechanical properties. *Mater. Sci. Eng. A.* 2020. Vol. 786. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139424>
 26. Lv J., Zheng J.-H., Yardley V.A., Shi Z., Lin J. A review of microstructural evolution and modelling of aluminium alloys under hot forming conditions. *Metals.* 2020. Vol. 10. No. 11. Paper 1516. <https://doi.org/10.3390/met10111516>.
 27. Kostin V.A., Grigorenko G.M. Modeling of additive process of formation of thin-walled cylindrical shells. *Electrometall. Today.* 2018. No. 04. P. 52—61. <https://doi.org/10.15407/sem2018.04.04>.
 28. Павлов И.М. Теория прокатки. М.: Metallurgizdat, 1950.
 29. Samusev S.V., Fadeev V.A., Sidorova T.Y. Development of effective roll-pass designs for production of longitudinally welded pipes of small and medium diameters. *Metallurgist.* 2020. No. 64. P. 658—664. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-01042-4>.
 30. Galkin S.P. Trajectory of deformed metal as basis for controlling the radial-shift and screw rolling. *Steel Transl.* 2004. No. 7. P. 63—66.
 31. Галкин С.П. Теория и технология стационарной винтовой прокатки заготовок и прутков малопластичных сталей и сплавов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: МИСиС, 1998.
Galkin S.P. Theory and technology of stationary helical rolling of blanks and bars of low-ductility steels and alloys: Abstract of a thesis of the dissertation of Dr. Sci. (Eng.). Moscow: MISIS, 1998 (In Russ.).
 32. Gamin Y.V., Akopyan T.K., Koshmin A.N., Dolbachev A.P., Goncharuk A.V. Microstructure evolution and property analysis of commercial pure Al alloy processed by radial-shear rolling. *Archiv. Civ. Mech. Eng.* 2020. Vol. 20. No. 143. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00143-w>.