

УДК 621.77.014

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-3-73-86>

Научная статья

Research article



Конечно-элементное моделирование параметров горячего плакирования тонколистового проката из экспериментального сплава Al–2%Cu–2%Mn

А.Н. Кошмин^{1,2}, А.В. Зиновьев², С.О. Черкасов², К.А. Цыденов²¹ Московский политехнический университет

Россия, 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

✉ Александр Николаевич Кошмин (koshmin.an@misis.ru)

Аннотация: Выполнен анализ температурных, скоростных и силовых параметров процесса горячего плакирования экспериментального сплава Al–2%Cu–2%Mn технически чистым алюминием марки 1050А, а также напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при относительной деформации 30, 40 и 50 %. В интервалах температур 350–450 °С, скоростей деформации 0,1–20 с^{–1} и истинной деформации 0,1–0,9, проведены пластометрические испытания и определены коэффициенты для расчета сопротивления деформации экспериментального сплава. Расчетно-теоретически определена теплопроводность сплава Al–2%Cu–2%Mn для условий горячего деформирования при температурах 350, 400 и 450 °С, которая составила 161, 159 и 151 Вт/(м·К) соответственно. Изучение особенностей процесса плакирования на двухвалковом стане выполнено в комплексе конечно-элементного моделирования QForm. Установлено, что при контакте металла плакирующего слоя с валком происходит его охлаждение на ~100 °С, а выравнивание температуры по высоте композита – в течение 20–30 мс после его выхода из очага деформации. Усилие прокатки равномерно распределено между двумя валками во всех рассматриваемых случаях, а момент прокатки на валке со стороны плакирующего слоя в 2 раза ниже, чем на контактирующем с основным, что характерно для асимметричной прокатки. Определены точки, характеризующие оптимальными условиями соединения слоев проката, расположенные на расстоянии 10 % и 70 % по длине очага деформации вдоль оси прокатки, в которых нормальные напряжения существенно преобладают над касательными. Установлено, что возникновение данных областей обусловлено характером пластического течения, в том числе наличием зоны отсутствия деформации твердого слоя и зоны прилипания.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, горячая прокатка, плакирование, алюминиевый сплав, реология, пластическая деформация, очаг деформации (ОД).

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01172, <https://rscf.ru/project/23-79-01172/>

Для цитирования: Кошмин А.Н., Зиновьев А.В., Черкасов С.О., Цыденов К.А. Конечно-элементное моделирование параметров горячего плакирования тонколистового проката из экспериментального сплава Al–2%Cu–2%Mn. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024;30(3):73–86. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-3-73-86>

Finite element simulation of hot cladding parameters for thin-sheet rolled products made of experimental Al–2%Cu–2%Mn alloy

A.N. Koshmin^{1,2}, A.V. Zinoviev², S.O. Cherkasov², K.A. Tsydenov²

¹ Moscow Polytechnic University

38 Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow 107023, Russia

² National University of Science and Technology “MISIS”

4 Bld. 1 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia

✉ Aleksander N. Koshmin (koshmin.an@misis.ru)

Abstract: An analysis was performed on the temperature, rate and force parameters of the hot cladding process for the experimental Al–2%Cu–2%Mn alloy with technically pure aluminum grade 1050A, as well as on the stress-strain state of the metal in the deformation zone at reductions of 30, 40, and 50 %. Plastometric tests were conducted within the temperature range of 350–450 °C, strain rates of 0.1–20 s^{–1}, and true strain of 0.1–0.9, and coefficients for calculating the flow stress of the experimental alloy were determined. The thermal conductivity of the Al–2%Cu–2%Mn alloy under hot deformation conditions at temperatures of 350, 400, and 450 °C was theoretically calculated to be 161, 159, and 151 W/(m·K), respectively. The study of the cladding process on a two-high rolling mill was carried out using the QForm finite element simulation software. It was found that when the metal of the cladding layer comes into contact with the roll, its temperature decreases by approximately 100 °C, with the temperature across the height of the composite equalizing within 20–30 ms after exiting the deformation zone. The rolling force is evenly distributed between the two rolls in all cases considered, while the rolling torque on the roll on the cladding layer side is half that on the roll contacting the base layer, which is characteristic of asymmetric rolling. Points characterized by optimal bonding conditions of the rolled layers were identified, located at 10 % and 70 % of the deformation zone length along the rolling axis, where normal stresses significantly prevail over shear stresses. It was determined that the formation of these areas is due to the nature of plastic flow, including the presence of a non-deforming hard layer and a sticking zone.

Keywords: finite element simulation, hot rolling, cladding, aluminum alloy, rheology, plastic deformation, deformation zone (DZ).

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant Project No. 23-79-01172, <https://rscf.ru/project/23-79-01172/>

For citation: Koshmin A.N., Zinoviev A.V., Cherkasov S.O., Tsydenov K.A. Finite element simulation of hot cladding parameters for thin-sheet rolled products made of experimental Al–2%Cu–2%Mn alloy. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2024;30(3):73–86.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-3-73-86>

Введение

Сплавы на основе алюминия получили широкое применение во многих отраслях промышленности, что обусловлено их удачным сочетанием эксплуатационных характеристик и относительно низкой стоимости [1]. Наибольшее распространение получила группа термически упрочняемых сплавов системы Al–Cu (1201, Д16, Д20 и др.). Однако общим недостатком материалов данной группы является необходимость их термической обработки — гомогенизации слитков перед деформацией, закалки и длительного искусственного старения деформированных полуфабрикатов (18–36 ч) для достижения максимально возможного уровня прочности, что существенно усложняет процесс производства из них полуфабрикатов.

В работе [2] исследован новый деформируемый и термически не упрочняемый сплав Al–2%Cu–

2%Mn, экономно легированный Zr и Sc, отличающийся лучшей технологичностью в сравнении с аналогами системы Al–Cu. Выполненные исследования [3] свидетельствуют, что даже в отсутствие дополнительного легирования базовый экспериментальный сплав демонстрирует хороший уровень функциональных свойств при комнатной температуре и сохраняет их при ее повышении в ходе эксплуатации.

Известно, что алюминиевые сплавы, легированные медью, подвержены коррозионному растрескиванию и расслаивающей коррозии [4]. Поэтому для защиты изделий из них применяют разные виды модифицирования поверхности [5]. Среди прочих плакирование алюминиевых сплавов техническим алюминием методом сварки прокаткой наиболее просто реализуемо и в отличие от

других способов обеспечивает надежную защиту основного слоя в условиях интенсивных тепловых и механических нагрузок [6].

Несмотря на достаточно длинную историю практического использования процесса горячего плакирования высокопрочных алюминиевых сплавов и большое количество выполненных исследовательских работ, в том числе с применением конечно-элементного (КЭ) анализа [7; 8], к настоящему времени полностью не установлены механизмы соединения разнородных металлов. Известно несколько теорий, объясняющих создание прочного адгезионного соединения металлов в результате обработки давлением: «пленочная», диффузионная и комплексная [9]. Однако бесспорно то, что основным процессом, определяющим соединение металлов, является совместная пластическая деформация. Она характеризуется продолжительностью воздействия, величиной создаваемых напряжений, степенью и скоростью деформации, а также температурными условиями процесса [10; 11]. Однако в настоящее время отсутствуют исследования, рассматривающие эту проблему с точки зрения влияния геометрических параметров очага деформации (ОД), силовых и скоростных условий деформирования слоистого плоского проката на процесс образования связи.

Задачами настоящей работы являлись изучение пластических характеристик сплава Al–2%Cu–2%Mn, разработка и построение конечно-элементной модели его плакирования технически чистым алюминием при различных деформационных параметрах и анализ полученных результатов.

Характеристика материалов исследования

В качестве материалов заготовок использовали технически чистый алюминий марки 1050A (EN 573-3:2007) и экспериментальный сплав системы Al–2%Cu–2%Mn (далее по тексту 2Cu2Mn). Их химический состав приведен в табл. 1. Для получения необходимых для моделирования фи-

зико-механических свойств материала была выплавлена заготовка из сплава 2Cu2Mn размером 20×120×135 мм, которую прокатывали при температуре 400 °С на двухвалковом листопрокатном стане ДУО 210Х300 при окружной скорости вращения валков 30 об/мин до толщины 15 мм для получения деформированной структуры. От прокатанного листа вдоль направления деформации отбирали цилиндрические образцы диаметром 5 мм и длиной 10 мм, реология которых была исследована на закалочно-деформационном dilatометре DIL805A/D («TA Instruments», США). Диапазон температурных и скоростных параметров испытаний на dilatометре был выбран исходя из характерных для данного материала условий горячей деформации и включал испытания при температурах $t = 350, 400, 450$ °С и скоростях деформации $\dot{\epsilon} = 0,1, 1,0, 10$ и 20 с⁻¹. Испытания образцов выполняли путем сжатия до достижения значения истинной деформации $\epsilon_t = 0,9$. В результате были получены кривые деформации экспериментального сплава, из которых после корректировки значений на трение и температуру определяли коэффициенты для уравнения расчета сопротивления деформации (σ) с учетом термического разупрочнения [12]:

$$\sigma = e^A \bar{\epsilon}^m \epsilon_t^{n_1} e^{\epsilon_t n_2} e^{l l},$$

где A, m, n_1, n_2, l — коэффициенты, характеризующие свойства материала.

Расчетные значения коэффициентов экспериментального и марочного [13] сплавов приведены в табл. 2. Там же представлены рассчитанные коэффициент корреляции (R^2) и критерий Фишера (F), подтверждающие адекватность моделей упрочнения сплавов.

Необходимым для выполнения моделирования параметром экспериментального сплава является теплопроводность, которую рассчитывали исходя из закона Видемана-Франца:

$$k/\gamma = LT,$$

где k — теплопроводность, Вт/(м·К); γ — электропроводность, См/м; L — число Лоренца, для алю-

Таблица 1. Химический состав исследуемых сплавов
Table 1. Chemical composition of the alloys under investigation

Сплав	Содержание, мас. %				
	Al	Cu	Mn	Si	Fe
2Cu2Mn	Основа	1,93 ± 0,05	1,94 ± 0,04	0,05 ± 0,04	≤ 0,01
1050A	99,79	—	—	0,18 ± 0,03	0,03 ± 0,02

Таблица 2. Коэффициенты для расчета сопротивления деформации при горячей прокатке
Table 2. Coefficients for flow stress calculation in hot rolling processes

Сплав	A	m	n_1	n_2	l	R^2	F
2Cu2Mn	6,2121	0,0756	−0,0382	−0,0046	−0,0616	0,9678	0,0170
1050A	4,9577	0,1475	0,1607	−0,0035	−0,0174	0,9744	0,0165

миниевых сплавов равное $2,23 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{Ом} \cdot \text{К}^{-2}$ [13]; T — температура, К.

С помощью вихретокового структуроскопа ВЭ-26НП (Россия) была измерена удельная электропроводность образца сплава 2Cu2Mn, отобранного от горячедеформированного листа, которая при комнатной температуре составила $15,3 \cdot 10^6 \text{ См/м}$. Величина γ экспериментального сплава для повышенных температур была получена экстраполяцией известных данных [14] применительно к измеренному значению. Таким образом, расчетная теплопроводность сплава при температурах 350, 400 и 450 °С составила 161, 159 и 151 Вт/(м·К) соответственно. Значения теплопроводности и теплоемкости материала лакирующего слоя взяты из стандартной библиотеки материалов программы моделирования для сплава 1050A и равны 226 Вт/(м·К) и 930 Дж/(кг·К) соответственно [15].

Методика КЭ-моделирования
Геометрические параметры модели
и исходные данные

В программном комплексе QForm 10.3 [16] выполнено моделирование процесса горячей прокатки — лакирования в режиме плоской задачи. В программу моделирования была импортирована геометрия инструмента с параметрами и характеристиками, аналогичными таковым прокатного стана ДУО 210 (Россия) (рис. 1, а). В качестве заготовок использовали две пластины из исследуемых сплавов разной исходной толщины h_b и h_c . Затем выполняли деформацию слоистой заготовки с относительным обжатием $\epsilon = 30, 40, 50 \%$ так, чтобы значения h_b и h_c в каждом случае составляли 5,85 и 0,65 мм, 6,3 и 0,7 мм, 6,75 и 0,75 мм соответственно. Таким образом, конечная суммарная толщина лакированного листа составила 5 мм. Исходная

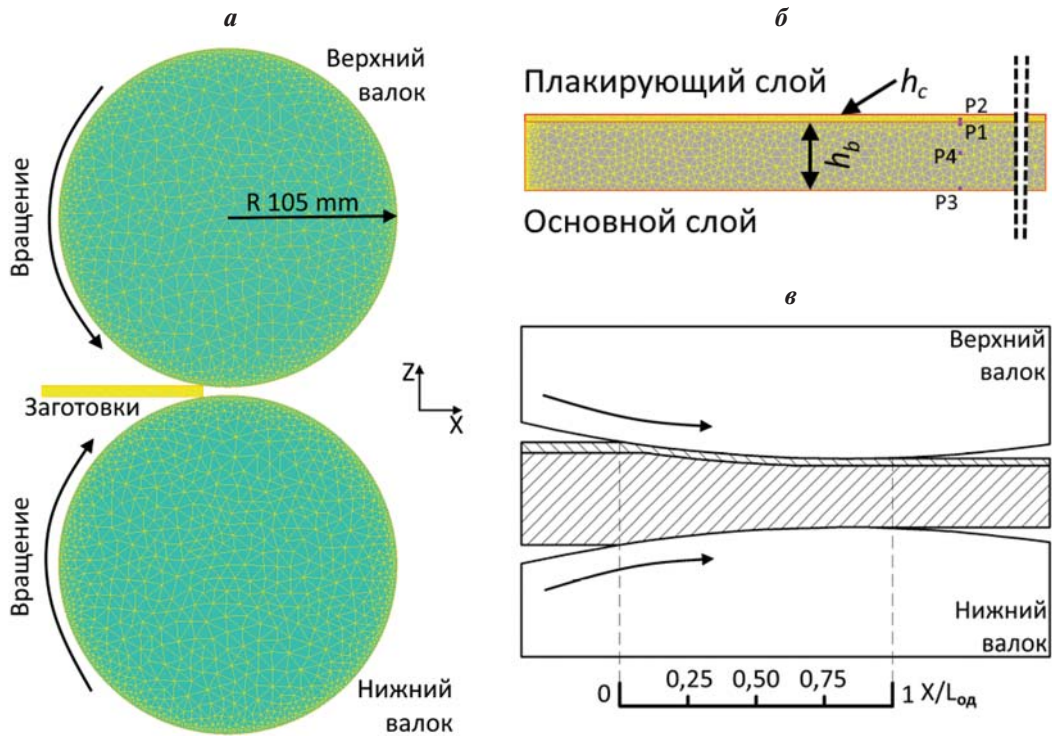


Рис. 1. Геометрия валкового узла (а), заготовок (б) и очага деформации (в)
Fig. 1. The geometry of the roll unit (а), workpieces (б), and deformation center (в)

длина и неотображаемая в плоской задаче ширина заготовок были равны по 100 мм.

Для исследования контактных напряжений и скоростей течения использовали трассируемые точки, расположенные по толщине заготовки на их ключевых и особо показательных участках. В соответствии с рис. 1, б они находятся:

- на контакте основного (P1) и плакирующего (P2) слоев;
- в месте контакта основного слоя с нижним валком (P3);
- в середине суммарной толщины проката (P4).

Основная работа по консолидации слоев происходит непосредственно от действия напряжений в очаге деформации. На рис. 1, в показан вид на очаг деформации, где схематично указана длина дуги контакта металла с валком по отношению к оси X ($X/L_{\text{ОД}}$). Анализ данных моделирования и построение графиков выполняли применительно к указанному участку.

В модели использовали треугольную форму конечных элементов, отлично подходящую для симуляции процессов плоской прокатки. Для повышения точности расчета выбран адаптивный тип перестройки расчетной сетки, коэффициент адаптации сетки в заготовках принят равным 3. Это означает, что отношение максимального размера объекта моделирования к размеру какого-либо элемента конечно-элементной сетки будет выдержано в заданном интервале, что полезно при использовании заготовок разной исходной толщины и при общем утончении их при прокатке. Основные исходные параметры модели приведены ниже:

Материал валков	41Cr4
Температура валков, °C	25
Температура заготовок, °C	400
Температура окружающей среды, °C	25
Количество КЭ инструмента, тыс. шт.	2,5
Количество КЭ в заготовке в начале/конце моделирования, тыс. шт.	10/15
Шаг по времени, мс	2,5

Деформационная и температурная модели

Система координат была выбрана таким образом, что ось наименьшей деформации совпала с отсутствующей в системе координат осью. В случае плоской прокатки листов данным направлением можно считать ось Y (рис. 2), так как именно в этом направлении происходит лишь уширение

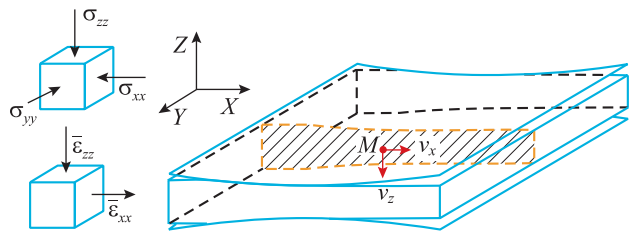


Рис. 2. Плоское деформированное состояние в случае прокатки тонкого листа

Fig. 2. Plane strain state in the case of thin sheet rolling

металла, которое значительно меньше, чем обжатие и вытяжка. В данном случае элементы сетки двигаются только в направлениях v_x и v_z , в площадках, перпендикулярных оси Y , отсутствуют касательные напряжения, а нормальное напряжение в направлении оси Y зависит от нормальных напряжений вдоль других осей и при пластической деформации равно

$$\sigma_{yy} = \frac{1}{2(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})}.$$

Тензоры напряжений (T_σ) и конечных деформаций (T_E) в рассматриваемом случае выглядят следующим образом:

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & 0 & \sigma_{xz} \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ \sigma_{zx} & 0 & \sigma_{zz} \end{pmatrix}, \quad T_E = \begin{pmatrix} E_{xx} & 0 & E_{xz} \\ 0 & 0 & 0 \\ E_{zx} & 0 & E_{zz} \end{pmatrix}.$$

Эквивалентная (пластическая) деформация (ϵ_{eq}) рассчитывалась с применением эквивалентной скорости пластической деформации ($\bar{\epsilon}_{\text{eq}}$) путем интегрирования суммы приращений вдоль траектории движения частицы:

$$\epsilon_{\text{eq}} = \int_t \bar{\epsilon}_{\text{eq}} dt,$$

$$\bar{\epsilon}_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{4}{9} \left\{ \frac{1}{2} [(\bar{\epsilon}_{xx} - \bar{\epsilon}_{zz})^2 + \bar{\epsilon}_{xx}^2 + \bar{\epsilon}_{zz}^2] + \frac{3}{4} \bar{\gamma}_{xz}^2 \right\}}.$$

К расчету теплообмена между парами заготовка—заготовка и заготовка—инструмент был применен режим «простого» теплообмена, ограниченного движения теплового потока от объекта к объекту приповерхностным слоем толщиной в 5 линейных элементов сетки. Данный режим выбран, исходя из высокой скорости процесса прокатки и, как следствие, малого времени контакта заготовок с инструментом, исчисляемого миллисекундами. Распространение теплового пото-

ка (q_n) в данном случае носит нормальный характер. Его величина рассчитывается по уравнению

$$q_n = b\alpha(t_1 - t_2),$$

где t_1 и t_2 — температура объектов модели, °С; α — коэффициент теплопередачи; $b = 0,05$ — коэффициент паузы, учитывающий расстояние между объектами. Значения коэффициента теплопередачи между инструментом и заготовками, а также между слоями заготовки приняты равными 100 000 и 120 000 Вт/(м²·К) соответственно [17].

Модель контакта

Модель контакта объектов в случае симуляции процесса плакирования является решающим фактором, влияющим на адекватность модели в целом. Для описания контактного взаимодействия пар заготовка—заготовка и заготовка—инструмент использовали закон Зибеля, который определяет касательные напряжения (τ) на поверхности заготовки как произведение фактора трения (k_f) и сопротивления деформации в контактирующих с инструментом и между собой слоях заготовок (σ):

$$\tau = k_f \frac{\sigma}{\sqrt{3}}.$$

Фактор трения оценивали экспериментально путем определения длительности процесса прокатки стандартных образцов длиной 200 мм из аналогичных исследуемым сплавов и сопоставления этого времени с модельным. Фактор трения для пар заготовка—инструмент, в том числе на границах валок—плакирующий слой и валок—основной слой, принят равным 2,5, а для пары заготовка—заготовка — 4. Большой фактор трения между заготовками выбран, исходя из условия подготовки их контактной друг к другу поверхности путем обезжиривания и механической обработки (повышения шероховатости).

В QForm для численной реализации совместной деформации двух объектов моделирования (заготовок) используется специальный контактный элемент, так как узлы сетки конечных элементов в контактирующих телах в общем случае не совпадают. На рис. 3 схематично показан принцип этого взаимодействия. Для наглядности контактирующие элементы разведены по нормали на расстояние, соизмеримое с размером элемента. Направление нормали показано вектором $\vec{n}$. В качестве узловых неизвестных использованы скорости узлов (v_p). В этом случае функция нормального усилия P_n , обеспечивающая минимиза-

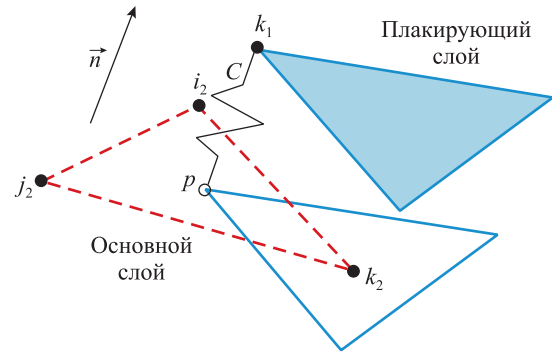


Рис. 3. Схема контактирующих конечных элементов двух заготовок [17]

Fig. 3. Schematic of contacting finite elements of two workpieces [17]

цию проникновения по нормали к поверхностям контакта заготовок, выглядит следующим образом:

$$P_n = C(v_n^{k_1} - v_n^p).$$

где C — коэффициент штрафа, определяемый как величина, превышающая наибольший из диагональных коэффициентов матриц жесткости обоих контактирующих тел. Таким образом, используя функции формы, силы в узлах контактного элемента определяются по формуле

$$P_n = P_n^{k_1} - P_n^{i_2} - P_n^{j_2} - P_n^{k_2}.$$

Результаты и их обсуждение

Температурные и силовые параметры процесса плакирования

Вне зависимости от степени деформации (ϵ) формирование температурных полей в заготовке носит схожий характер (рис. 4). Так, на входе в ОД происходит почти моментальное снижение температуры металла на контакте с инструментом — в среднем на 100 °С. Далее по мере продвижения заготовок вдоль оси прокатки температура их поверхностей постепенно выравнивается, стремясь к температуре внутренней неконтактной области. Этому способствует деформационный разогрев основного слоя, не только не снижающий, но и повышающий его температуру на 10 °С от исходной.

Отдельного внимания заслуживает остывание плакирующего слоя. Снижение его температуры при контакте с валком происходит по всей его толщине, однако не распространяется на основной слой, температура которого остается вы-

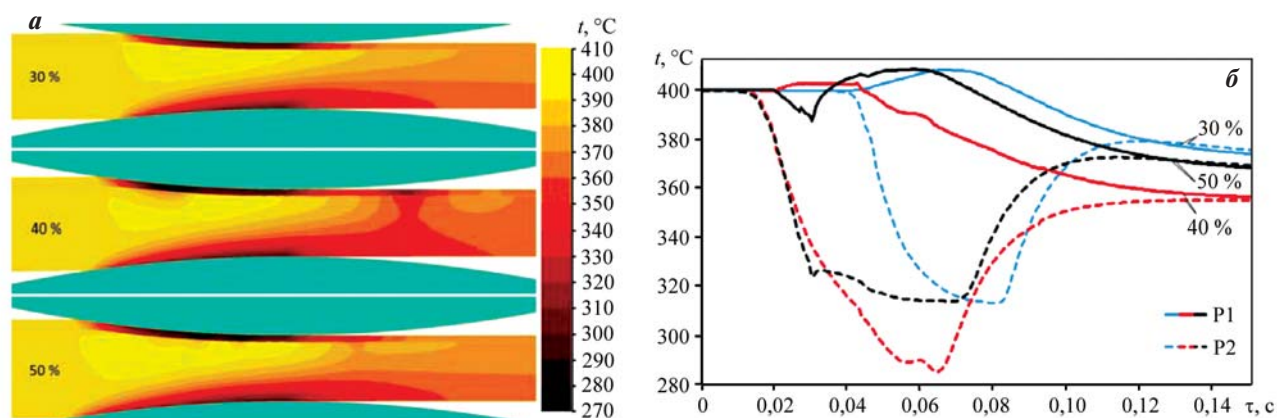


Рис. 4. Температурные поля в очаге деформации (а) и температура в зависимости от времени прохождения очага деформации в основном (P1) и плакирующем (P2) слоях в процессе прокатки (б)

Цифры у кривых — значения степени относительной деформации

Fig. 4. Temperature fields in the deformation zone (a) and temperature as a function of deformation zone transit time in the base (P1) and cladding (P2) layers during rolling (б)

Numbers at the curves are values of the strain ratio

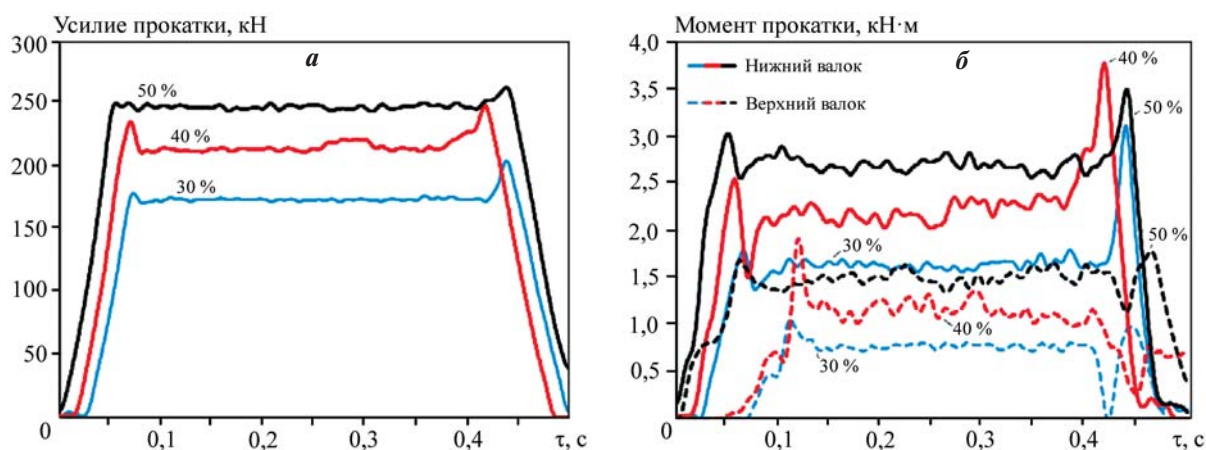


Рис. 5. Изменение усилия (а) и момента (б) в ходе прокатки

Цифры у кривых — значения степени относительной деформации

Fig. 5. Change in force (a) and torque (б) during the rolling process

Numbers at the curves are values of the strain ratio

сокой. Данный факт обусловлен особенностями программного расчета теплопередачи, который ведется отдельно для каждой заготовки, без возможности исключить после прохождения очага деформации учет коэффициента паузы b . Иными словами, в данной температурной модели не учитывается образование сварного соединения (адгезии) между слоями. Тем не менее результаты изменения температуры слоистого проката выглядят адекватно. Температура каждого слоя на приконтактных участках во всех случаях имеет тенденцию к выравниванию по прошествии 20–30 мс после выхода композита из ОД.

Изменение силовых параметров процесса плакирования носит весьма традиционный характер. На кривых изменения усилия прокатки (рис. 5, а) хорошо прослеживаются все основные стадии процесса: захват заготовок валками, установившаяся стадия и выход металла из валков. Величина усилия на установившейся стадии составляет 175, 215 и 250 кН при обжатиях $\epsilon = 30, 40$ и 50 % соответственно. Здесь прослеживается тенденция к увеличению усилия прокатки на 20 % при повышении относительного обжатия на 10 %. Момент прокатки изменяется во времени менее предсказуемо. Тут также наблюдаются пики кривых, соответствующие

щие захвату и выходу металла из валков, однако установившаяся стадия характеризуется обилием колебаний (рис. 5, б). Это может быть обусловлено именно нахождением в очаге деформации двух объектов, межконтактное трение которых неодинаково вдоль ОД.

Еще одна особенность — различие в величине момента прокатки, действующего на верхнем и нижнем валках. Момент на нижнем валке, контактирующем с металлом основного слоя, превышает величину, действующую на верхнем, в среднем в 2 раза для всех рассматриваемых случаев. Обусловлено это разницей в сопротивлении деформации исследуемых сплавов, оказывающем непосредственное влияние на условия контактного трения. Однако при сопоставлении усилий прокатки, действующих на нижние и верхние валки в каждом случае симуляции, столь высокого расхождения не наблюдалось, и составило оно максимум 10 %.

Напряженно-деформированное состояние проката в очаге деформации

Характер формирования эквивалентной деформации (ϵ_{eq}) и распределение эквивалентной скорости пластической деформации ($\dot{\epsilon}_{eq}$) вдоль ОД показаны на рис. 6. Как видно, величина относительного обжатия существенно влияет на данные характеристики. С увеличением обжатия заметно возрастает протяженность очага деформации, а следовательно, и время контакта соединяемых

поверхностей под действием давления. Наклеп основного слоя с повышением ϵ происходит не так интенсивно, как плакирующего. Это связано как с температурными условиями (сильным охлаждением на всю толщину плакирующего слоя), так и с иной картиной распределения эквивалентной скорости деформации, которая в приконтактной зоне плакирующего слоя при относительном обжатии на 30, 40 и 50 % составила 0,9, 1,25 и 1,6 соответственно. Значения эквивалентной скорости деформации во всех случаях примерно одинаковы: до 80 с^{-1} на входе в ОД (в зоне максимальной осадки) и в среднем 15 с^{-1} в середине толщины проката (и в среднем по всему ОД).

Поля распределения величины $\bar{\epsilon}_{eq}$ позволяют также сделать некоторые наблюдения. Наиболее интенсивно деформация проходит на входе и выходе из очага деформации в зонах контакта заготовок с инструментом. Протяженность этих зон в каждом случае разная, однако их объемная доля относительно всего геометрического ОД одинакова. Возникновение столь показательных X-образных картин распределения $\bar{\epsilon}_{eq}$ связано с характером течения металла и сопутствующего развития сдвиговых деформаций на данных участках.

В ряде исследований [18; 19] приводятся утверждения о наличии закономерности адгезии поверхностей слоистого проката, обладающих существенно разной прочностью (твердостью). Из них следует, что высокая разница в прочности кон-

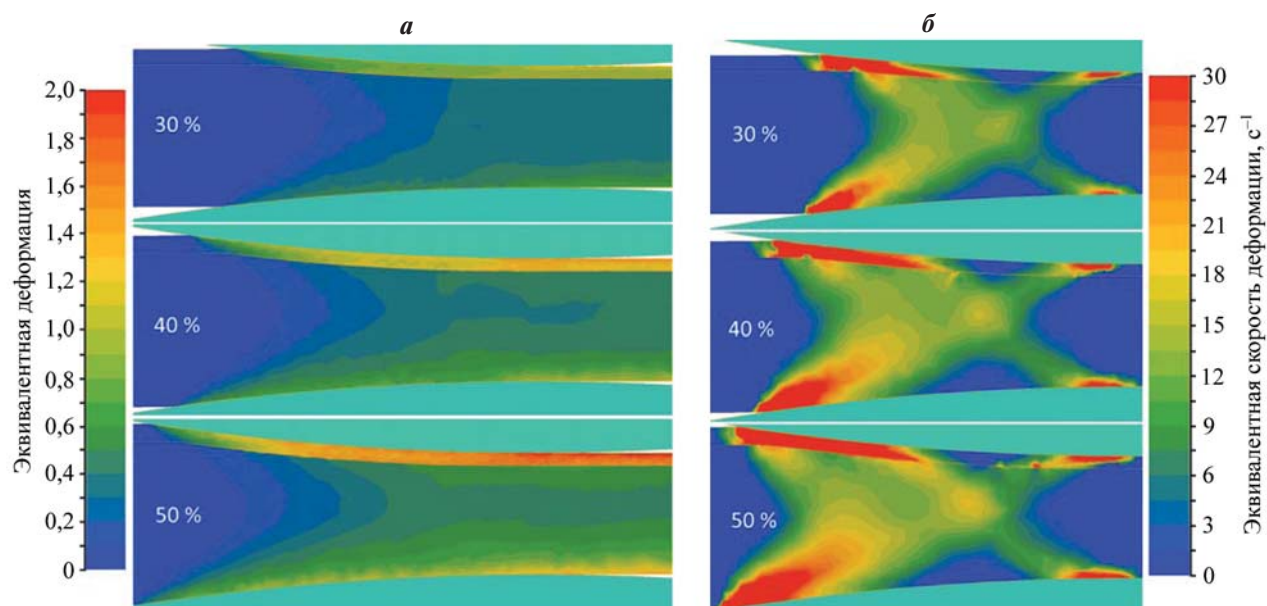


Рис. 6. Поля распределения эквивалентной деформации (а) и скорости деформации (б) в ОД при разных значениях относительного обжатия

Fig. 6. Distribution fields of equivalent strain (а) and strain rate (б) in the deformation zone at different values of strain

тактирующих поверхностей соединяемых листов способствует неравномерному течению металла заготовок внутри очага деформации относительно друг друга. Таким образом возникают дополнительные касательные напряжения между слоями, снижающие эффект от работы нормальных напряжений и, как результат, препятствующие образованию крепкого сварного соединения в ОД. Так же, принимая во внимание «пленочную» теорию соединения металлов, можно предположить, что

высокая прочность поверхностей соединяемых листов будет способствовать более эффективному разрушению оксидных пленок при деформации и соединению образованных ювенильных участков.

На рис. 7 показано изменение сопротивления деформации (σ) основного (P1) и плакирующего (P2) слоев вдоль очага деформации. Сопротивление деформации в QForm рассчитывается как распределение значений σ (напряжения течения), заданных в свойствах материала, в зависимости от

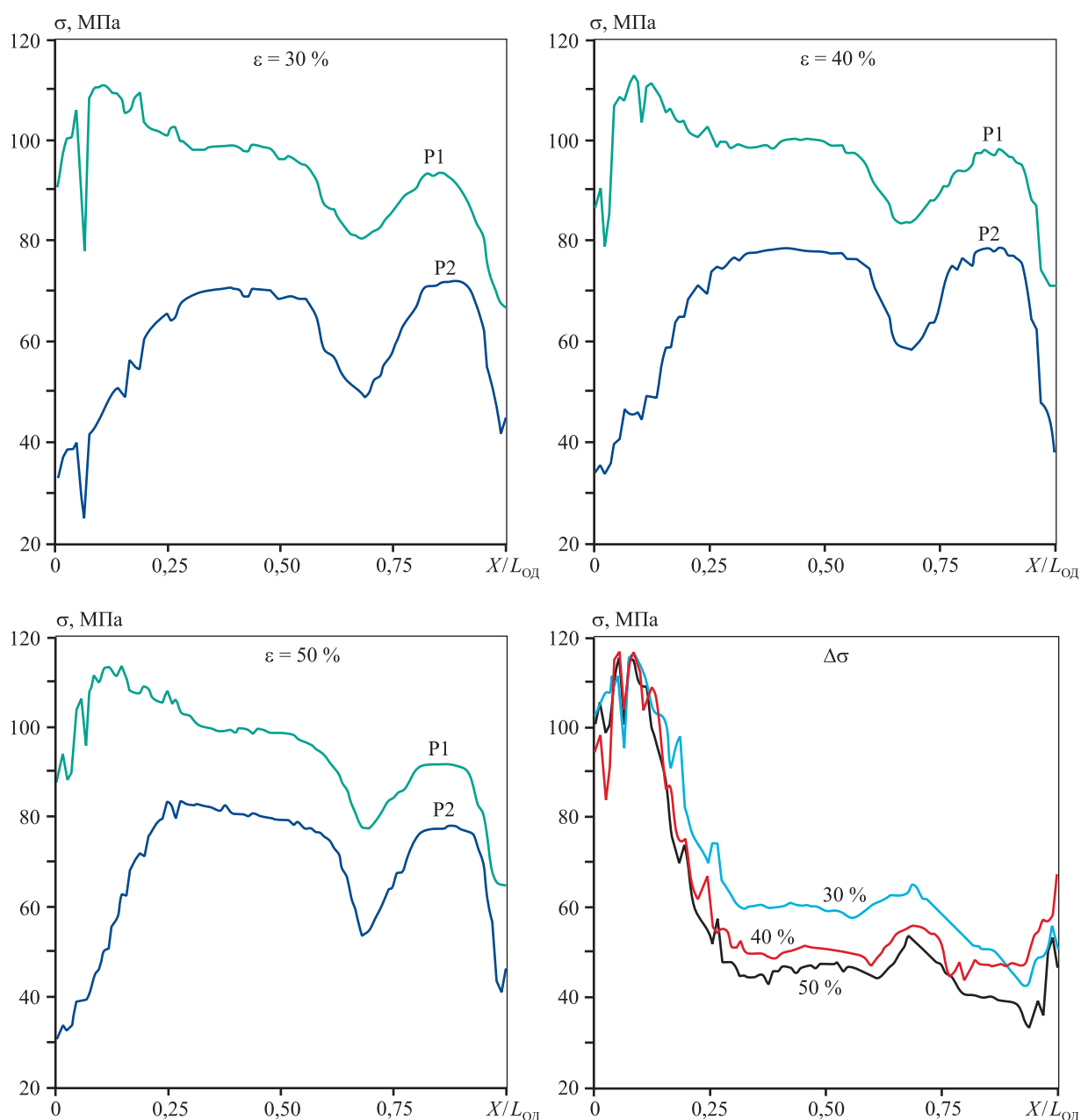


Рис. 7. Изменение сопротивления деформации основного (P1) и плакирующего (P2) слоев и разность их сопротивления деформации ($\Delta\sigma$) вдоль длины очага деформации

Fig. 7. Change in the flow stress of the base (P1) and cladding (P2) layers and the difference in their flow stresses ($\Delta\sigma$) along the length of the deformation zone

эквивалентной деформации, скорости деформации и температуры. Следует отметить, что длина ОД относительно оси X унифицирована для всех рассматриваемых случаев, однако его реальная геометрическая длина так же, как и время контакта под действием усилия прокатки, с каждым увеличением относительного обжатия на 10 % возрастает на ~15 %. Из графиков видно, что сопротивление деформации основного слоя слабо меняется в зависимости от величины обжатия и в среднем составляет 100 МПа, а в случае плакирующего слоя оно подвержено влиянию обжатия сильнее: ~70 МПа при $\epsilon = 30\%$ и ~80 МПа при $\epsilon = 40$ и 50 %.

Рост величины σ обусловлен закономерным ростом ϵ_{eq} с увеличением обжатия, а равные значения σ при $\epsilon = 40$ и 50 % объясняются большим охлаждением плакирующего слоя при $\epsilon = 40\%$, что четко прослеживается на рис. 4. Во всех рассматриваемых случаях на длине очага деформации 0,65–0,70 можно отметить снижение значений σ примерно на 25 % и последующее их восстановление до предыдущего уровня, который сохраняется вплоть до выхода металла из валков. Данный факт объясняется прохождением трассируемых точек области с относительно низкой эквивалентной скоростью пластической деформации (синие области на рис. 6, б), а также общим уменьшением на этом участке действующих нормальных и касательных напряжений (σ_{xx} и σ_{zz} соответственно). Сопоставляя разность в значениях сопротивления деформации поверхностей каждого слоя ($\Delta\sigma$), отмечается планомерное их снижение с увеличением относительной деформации, что очевидно: наименьшая величина $\Delta\sigma$ достигается при обжатии в 50 %. Из

данных графиков также можно вывести, что достижение идентичности прочности поверхности слоев обеспечено упрочнением плакирующего слоя с одной стороны и разупрочнением основного слоя вследствие разогрева с другой.

Совокупность параметров процесса прокатки, имеющих место при совместной деформации двух заготовок и характеризующихся неоднородностью по длине и высоте ОД, таких как температура, скорость течения, скорость деформации, прочность поверхностей слоев и др., приводит к росту действующих на границе слоев касательных напряжений. Для оценки их влияния на формирование соединения композита использовали стандартные подпрограммы QForm — «Давление» и «Трение», рассчитывающие величины нормального напряжения давления (σ_d) и касательного напряжения трения (τ_t).

На рис. 8, а показано изменение напряжения трения вдоль очага деформации. Очевидно, что величина τ_t в каждой точке ОД и в каждом рассмотренном случае может отличаться от представленной ввиду подверженности множеству слабо контролируемых факторов контактного взаимодействия двух заготовок при совместной деформации. Неоспоримым остается характер полученных картин распределения данного вида напряжений вдоль ОД, идентичный таковому при прокатке с разной величиной ϵ . Так, можно отметить, что τ_t с момента входа металла в очаг деформации и по достижении им значения 0,1 по длине ОД почти не изменяется, что связано с отсутствием пластической деформации основного слоя на данном участке. Затем по мере продвижения вдоль ОД воз-

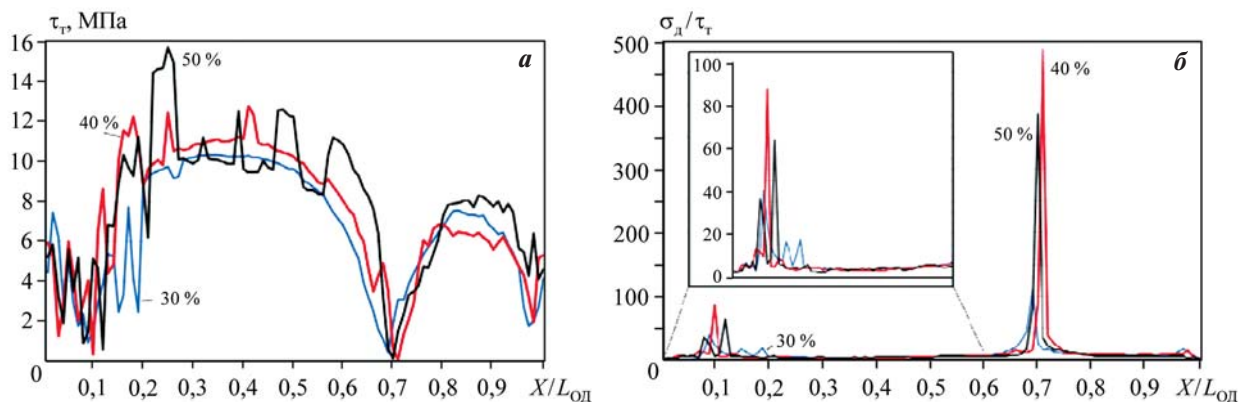


Рис. 8. Изменение вдоль очага деформации касательных напряжений между слоями проката (а) и отношения нормального напряжения к касательному (б)

Fig. 8. Variation along the deformation zone of tangential stresses between rolled layers (а) and the ratio of normal stress to tangential stress (б)

растает неоднородность скоростей деформации и пластического течения слоев, что приводит к росту τ_t . Приближаясь к нейтральному сечению ОД, уровень напряжений плавно снижается, стремясь к нулю, и после снова демонстрирует рост.

Характер изменения действующих нормальных напряжений вдоль очага деформации более равномерен. Он колеблется от 150 МПа на входе в ОД до 225 МПа на выходе. Это прослеживается и на графике отношения σ_d/τ_t (рис. 8, б). Как видно по кривым, это отношение на $>70\%$ длины ОД составляет 5, что свидетельствует о хороших условиях для формирования межслойной связи в целом. В каждом рассмотренном случае на кривых можно отметить два характерных пика — на длинах ОД 0,1 и 0,7. Первый пик символизирует начало образования сварного соединения слоев, сопряженное со стартом пластической деформации основного слоя, второй — связан с улучшением условий контактного взаимодействия на данном участке, а именно падением скорости деформации и сопутствующим снижением τ_t до нуля. Можно считать, что в данной точке происходит наибольшая работа по соединению слоев под действием нормальных напряжений.

Обсуждение результатов моделирования

На рис. 9 показано изменение скорости движения трассируемых точек, расположенных на контакте с валком, на межслойной границе и на $1/2$ толщины композита при прокатке с $\varepsilon = 40\%$. Кривые представляют собой типичную для процесса продольной прокатки картину, позволяющую провести границу зон отставания и опережения, расположенную на 0,65 от длины ОД. При этом отмечаемые на рис. 7 и 8 резкие изменения

в значениях проявляют себя на длине очага 0,70. Это объясняется существенной неравномерностью в распределении скорости течения металла по высоте ОД, что видно на полях в заготовке на рис. 9. Можно отметить, что зона прилипания имеет I-образную форму и ее центр (нейтральное сечение) слегка наклонен, что обусловлено прокаткой разнородных металлов и, соответственно, разными значениями крутящего момента на верхнем и нижнем валках.

Таким образом, характер пластического течения металла в очаге деформации оказал наиболее существенное влияние на результаты, приведенные в предыдущем разделе. Так, под его влиянием образованы зоны с низкими значениями скорости деформации, которые способствовали снижению сопротивления деформации обоих слоев. В этой же точке напряжения трения равны нулю.

Полученные результаты моделирования плакирования при разных величинах обжатия неоднозначны. С одной стороны, увеличение степени деформации послужило упрочнению плакирующего слоя, тем самым существенно снизив отношение сопротивления деформации основного слоя к плакирующему (σ_{p1}/σ_{p2}) с 3 до 1,5, с другой — влияние степени деформации слабо отразилось на действующих вдоль оси прокатки напряжениях трения. Это позволяет утверждать, что влияние контактного и межслойного трения в условиях тонколистовой прокатки несущественно, и успех соединения слоев металлов в данном случае гарантируется действием нормальных напряжений, обеспечиваемых повышением степени деформации.

В целом сравнение полученных результатов исследования с элементами классической теории

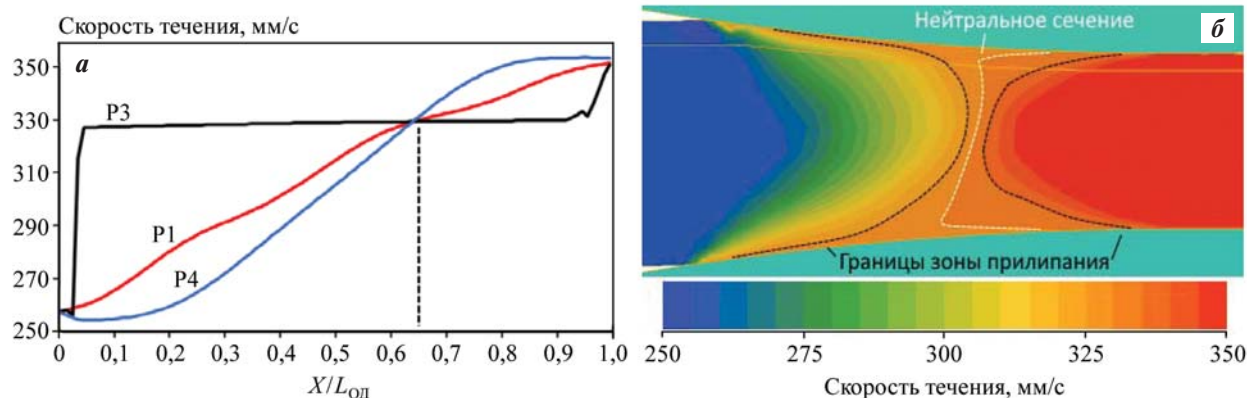


Рис. 9. Скорость движения трассируемых точек вдоль оси X (а) и поля скорости течения в очаге деформации (б)

Fig. 9. Velocity of traced points along the X -axis (a) and flow velocity fields in the deformation zone (b)

продольной прокатки [20–23] и современными расчетными и экспериментальными результатами [24–29] позволяет сделать вывод об адекватности построенной модели и эффективности примененных расчетных методик и программного комплекса.

Выводы

1. С применением программного комплекса КЭ-моделирования QForm выполнена симуляция процесса плакирования экспериментального сплава Al–2%Cu–2%Mn технически чистым алюминием при степени относительной деформации 30, 40 и 50 %. Изучены температурно-скоростные и деформационные параметры процесса, напряжения металла слоев вдоль очага деформации.

2. Установлено, что упрочнение плакирующего (более мягкого) слоя происходит интенсивнее с увеличением степени деформации. Эквивалентная деформация в зоне контакта плакирующего слоя с основным при относительном обжатии на 30, 40 и 50 % составила 0,9, 1,25 и 1,6 соответственно. Данный факт способствовал снижению разности сопротивления деформации контактных поверхностей слоев проката.

3. При изучении особенностей контактного взаимодействия поверхностей слоистого проката установлены характерные области на длине очага деформации 0,1 и 0,7 относительно оси X, которые характеризуются превалированием действия нормальных напряжений над касательными. Возникновению данных областей способствовало неравномерное течение металла в очаге, вызванное разницей в деформационных характеристиках материалов основного и плакирующего слоев.

4. Полученные расчетные значения нормальных и касательных напряжений между слоями заготовок вдоль очага деформации позволяют предположить, что их сцепление во всех рассматриваемых случаях произойдет по всей длине проката, однако прочность сцепления во всех случаях будет отличаться.

Список литературы/References

- Захаров А.М. Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие. М.: Металлургия, 1980. 255 с.
- Belov N.A., Alabin A.N., Matveeva I.A. Optimization

of phase composition of Al–Cu–Mn–Zr–Sc alloys for rolled products without requirement for solution treatment and quenching. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;583:206–213.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.202>

- Belov N.A., Akopyan T.K., Shurkin P.K., Korotkova N.O. Comparative analysis of structure evolution and thermal stability of commercial AA2219 and model Al–2 wt.%Mn–2 wt.%Cu cold rolled alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;864:158823. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158823>
- Ghali E. Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: Understanding, performance, and testing. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 752 p.
- Зарапин Ю.Л., Чиченев Н.А., Чернилевская Н.Г. Производство композиционных материалов обработкой давлением. Последние достижения. М.: Металлургия, 1991. 351 с.
- Зиновьев А.В., Колпашиников А.И., Полухин П.И., Глебов Ю.П., Пирязев Д.И., Горохов В.С., Галкин А.М. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов: Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1992. 512 с.
- Khan H.A., Asim K., Akram F., Hameed A., Khan A., Mansoor B. Roll bonding processes: State-of-the-Art and future perspectives. *Metals*. 2021;11:1344. <https://doi.org/10.3390/met11091344>
- Li Z., Rezaei S., Wang T., Han J., Shu X., Pater Z., Huang Q. Recent advances and trends in roll bonding process and bonding model: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2023;36(4):36–74. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.07.004>
- Кобелев А.Г., Лысак В.И., Чернышев В.Н., Кузнецов Е.В. Материаловедение и технология композиционных материалов: Учебник для вузов. М.: Интермет Инжениринг, 2006. 368 с.
- Shatalov R.L., Kulikov M.A. Influence of outer parts of a strip on the deformation and force parameters of thin-sheet rolling. *Metallurgist*. 2020;64:687–698. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-01045-1>
- Shatalov R.L., Maksimov E.A. Development and application of the theory of rigid ends in thin-sheet rolling. *Metallurgist*. 2021;64:1035–1042. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01084-2>
- Rao K.P., Doraivelu S.M., Gopinathan V. Flow curves and deformation of materials at different temperatures and strain rates. *Journal of Mechanical Working Technology*. 1982;6(1):63–88. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(82\)90020-1](https://doi.org/10.1016/0378-3804(82)90020-1)
- Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. М.: Металлургия, 1983. 352 с.

14. Aksöz S., Ocak Y., Maraşlı N., Çadiri E., Kaya H., Böyük U. Dependency of the thermal and electrical conductivity on the temperature and composition of Cu in the Al based Al–Cu alloys. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010;34(8):1507–1516.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.07.015>
15. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
16. QForm. Версия 10.3. Windows. М.: ООО «Квантор-форм», 2023.
17. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А., Биба Н.В., Шитиков А.А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 383 с.
18. Qin Q., Zhang D., Zang Y., Guan B. A simulation study on the multi-pass rolling bond of 316L/Q345R stainless clad plate. *Advances in Mechanical Engineering*. 2015;7(7).
<https://doi.org/10.1177/1687814015594313>
19. He Z., Chu Z., Shuang Y., Gou Y. The Bonding mechanism and experimental verification of pilger hot rolling clad tube. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020;2020:2689370.
<https://doi.org/10.1155/2020/2689370>
20. Колпашников А.И. Прокатка листов из легких сплавов. М.: Металлургия, 1970. 232 с.
21. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки: Учебник для студентов машиностроительных и металлургических вузов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
22. Полухин П.И., Зиновьев А.В., Полухин В.П., Буров А.В., Шевелкин С.Д. Повышение качества полос из цветных металлов и сплавов. Алма-Ата: Наука, 1982. 288 с.
23. Ковалев С.И., Корягин Н.И., Ширков И.В. Напряжения и деформации при плоской прокатке. М.: Металлургия, 1982. 256 с.
24. Kebriaei R., Vladimirov I.N., Reese S. Joining of the alloys AA1050 and AA5754 — Experimental characterization and multiscale modeling based on a cohesive zone element technique. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214(10):2146–2155.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.014>
25. Bambach M., Pietryga M., Mikloweit A., Hirt G. A finite element framework for the evolution of bond strength in joining-by-forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214(10):2156–2168.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.015>
26. Frolov Y., Nosko M., Samsonenko A., Bobukh O., Re-mez O. Roll bonding of Al-based composite reinforced with C10 steel expanded mesh inlay. *Metals*. 2021;11:1044.
<https://doi.org/10.3390/met11071044>
27. Frolov Y., Bobukh O., Samsonenko A., Nürnberger F. Patterning of surfaces for subsequent roll bonding in a low-oxygen environment using deformable mesh inlays. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023;7:158. <https://doi.org/10.3390/jmmp7050158>
28. Салиханов Д.Р. Исследование напряженно-деформированного состояния на границе между материалами при прокатке слоистого композита. *Черные металлы*. 2023;9:34–39.
<https://doi.org/10.17580/chm.2023.09.06>
Salikhyanov D.R. Investigation of the stress-strain state at the boundary between materials during rolling of a layered composite. *Chernye Metally*. 2023;9:34–39.
29. Salikhyanov D., Michurov N. Joining of dissimilar aluminum alloys AA5154 and AA2024 by cold roll bonding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;129:255–277.
<https://doi.org/10.1007/s00170-023-12292-2>

Информация об авторах

Александр Николаевич Кошмин — к.т.н., доцент сектора научной деятельности Московского политехнического университета; доцент кафедры обработки металлов давлением Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (НИТУ МИСИС).
<https://orcid.org/0000-0002-4095-1658>
E-mail: koshmin.an@misis.ru

Александр Васильевич Зиновьев — д.т.н., проф., вед. эксперт научного проекта кафедры обработки металлов давлением, НИТУ МИСИС.
<https://orcid.org/0009-0004-6776-7414>
E-mail: zinovyew@gmail.com

Станислав Олегович Черкасов — инженер научного проекта кафедры обработки металлов давлением, НИТУ МИСИС.
<https://orcid.org/0000-0001-5248-501X>
E-mail: cherkasov.so@misis.ru

Кирилл Андреевич Цыденов — инженер научного проекта кафедры обработки металлов давлением, НИТУ МИСИС.
<https://orcid.org/0000-0002-9290-4925>
E-mail: kirillcydenov@yandex.ru

Information about the authors

Aleksander N. Koshmin — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Scientific Activity Sector of Moscow Polytechnic University; Associate Professor of Metal Forming Department of National University of Science and Technology “MISIS” (NUST MISIS).
<https://orcid.org/0000-0002-4095-1658>
E-mail: koshmin.an@misis.ru

Aleksander V. Zinoviev — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior Expert of Metal Forming Department, NUST MISIS.
<https://orcid.org/0009-0004-6776-7414>
E-mail: zinovyew@gmail.com

Stanislav O. Cherkasov — Engineer of Metal Forming Department, NUST MISIS.
<https://orcid.org/0000-0001-5248-501X>
E-mail: cherkasov.so@misis.ru

Kirill A. Tsydenov — Engineer of Metal Forming Department, NUST MISIS.
<https://orcid.org/0000-0002-9290-4925>
E-mail: kirillcydenov@yandex.ru

Вклад авторов

А.Н. Кошмин — написание статьи, методология.

А.В. Зиновьев — концептуализация, рецензирование статьи.

С.О. Черкасов — моделирование, обработка результатов.

К.А. Цыденов — эксперимент, обсуждение результатов.

Contribution of the authors

A.N. Koshmin — manuscript writing, methodology.

A.V. Zinoviev — conceptualization, manuscript review.

S.O. Cherkasov — simulation, results processing.

K.A. Tsydenov — experiment, results discussion.

Статья поступила в редакцию 12.02.2024, доработана 18.04.2024, подписана в печать 25.04.2024

The article was submitted 12.02.2024, revised 18.04.2024, accepted for publication 25.04.2024