

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.774.38
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-43-53



ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРЕССОВАНИЯ ЛЕГКОСПЛАВНОЙ БУРИЛЬНОЙ ТРУБЫ НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН

Замараева Ю.В.^{1,3}, Логинов Ю.Н.^{3,4}, Дегтярева О.Ф.², Разинкин А.В.¹

¹ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия

²ООО «Бурильные трубы», Каменск-Уральский, Россия

³Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

⁴Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Применение легкосплавных бурильных труб актуально в настоящее время. Одной из проблем их производства является образование продольных трещин в технологии горячего прессования. Цель данной работы – установление связи напряженно-деформированного состояния и образования продольных трещин на легкосплавных бурильных трубах с наружными концевыми утолщениями. В качестве объекта исследования выбрана труба из сплава Д16Т. Посредством компьютерного моделирования определены значения тангенциальных растягивающих напряжений и скорости деформации в зоне очага деформации и раздачи на конусном участке прессовой иглы, приводящие к появлению на наружной поверхности труб продольных трещин в зоне концевых утолщений и переходных зонах от утолщения к основному сечению. Выявлено, что наиболее опасной зоной с позиции трещинообразования является наружная поверхность переднего торца трубы. Кроме того, установлено, что утяжинное концевое утолщение имеет уровень тангенциальных растягивающих напряжений ниже, чем выходное концевое утолщение. В рамках работы определено, что одновременное понижение температуры заготовки и инструмента на 20°C и скорости движения инструмента на 0,4 мм/с приводят к значительному понижению уровня растягивающих напряжений в опасных зонах трубы. Изменение температурно-скоростных условий процесса в условиях реального производства привело к уменьшению процента несоответствующей продукции по дефекту «продольные трещины» в 2,6 раза.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, легкосплавные бурильные трубы, продольные трещины, тангенциальные напряжения, скорость деформации, моделирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

© Замараева Ю.В., Логинов Ю.Н., Дегтярева О.Ф., Разинкин А.В., 2026

Для цитирования

Влияние напряженно-деформированного состояния в процессе прессования легкосплавной бурильной трубы на образование трещин / Замараева Ю.В., Логинов Ю.Н., Дегтярева О.Ф., Разинкин А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 43-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-43-53>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF THE STRESS-STRAIN STATE DURING THE EXTRUSION OF A LIGHT-ALLOY DRILL PIPE ON CRACK FORMATION

Zamaraeva Yu.V.^{1,3}, Loginov Yu.N.^{3,4}, Degtyareva O.F.², Razinkin A.V.¹¹ JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia² LTD Drill Pipes, Kamensk-Uralsky, Russia³ M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia⁴ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The use of light-alloy drill pipes is currently highly relevant. One of the problems in their production is the formation of longitudinal cracks during hot extrusion. The aim of this study is to establish the relationship between the stress-strain state and the formation of longitudinal cracks in light-alloy drill pipes with external end thickenings. Pipes made of D16T alloy have been selected as the object of study. Computer modeling has been used to determine the values of tangential tensile stresses and strain rate in the deformation zone and expansion zone on the conical section of the extrusion mandrel that lead to the formation of longitudinal cracks on the outer surface of the pipes in the zone of the end thickenings and in the transition zones from the thickened section to the main section. It has been found that the most critical zone in terms of crack formation is the outer surface of the front end of the pipe. In addition, it has been established that the swaged end thickening is characterized by a lower level of tangential tensile stresses than the outlet end thickening. The study has demonstrated that simultaneously reducing the billet and tooling temperatures by 20°C and the tooling speed by 0.4 mm/s results in a significant decrease in the level of tensile stresses in the critical zones of the pipe. Changing the temperature and speed conditions of the process under actual production conditions resulted in a 2.6-fold reduction in the percentage of nonconforming products due to the “longitudinal cracks” defect.

Keywords: aluminum alloy, light alloy drill pipes, longitudinal cracks, tangential stresses, strain rate, modeling

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation

Zamaraeva Yu.V., Loginov Yu.N., Degtyareva O.F., Razinkin A.V. Influence of the Stress-Strain State During the Extrusion of a Light-Alloy Drill Pipe on Crack Formation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 43-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-43-53>

Введение

Применение алюминиевых сплавов для изготовления легкосплавных бурильных труб (ЛБТ) актуально в настоящее время [1–4]. По сравнению со стальными трубами ЛБТ обладают, например, меньшим удельным весом и модулем упругости, а также более высокими удельной прочностью, демпфирующей способностью и коррозионными свойствами [5, 6].

В нефтегазовой отрасли применяют трубы следующих конфигураций: с внутренними концевыми утолщениями, с внутренними концевыми и протекторным утолщениями, с наружными концевыми утолщениями, с внутренними и наружными концевыми утолщениями.

ЛБТ, имеющие наружные утолщения на концах и плавный переход от них к основному телу трубы, находят широкое применение в бурильной технике [7]. Требуемая конфигурация данных труб создается в процессе прессования за счет конструкции профилированной иглы, меняющей свое положение относительно калибрующего пояска матрицы [8, 9]. Наиболее часто для изготовления труб применяется алюминиевый сплав Д16 при использовании какого-либо варианта термоме-

ханической обработки [10–12]. При этом одной из проблем производства бурильных труб из Д16Т является образование трещин на этапе изготовления.

Многочисленные научные работы посвящены анализу трещинообразования при прессовании [13, 14]. Известно, что в полуфабрикатах могут наблюдаться продольные трещины, причиной которых являются повышенные тангенциальные растягивающие напряжения в области, прилегающей к калибрующему пояску матрицы. Часто трещины возникают, если вместе с действием растягивающих напряжений снижена пластичность материала, например из-за неблагоприятной схемы напряженного состояния, превышения температуры или скорости прессования [15]. В работе [16] установлено, что образование продольных трещин на переднем конце горячепрессованных алюминиевых труб связано с малым уровнем деформации в этой области, что ухудшает структуру и снижает пластичность металла.

Также известны работы по изучению процесса раздачи труб с наружными утолщениями [17–19]. Авторами работ [20, 21] проанализирована раздача трубы из сплава Д16, в результате чего, например, установлено, что увеличение радиуса скругления,

плавного соединяющего конический и цилиндрический участки бурта иглы, приводит к существенному уменьшению приращения внутреннего диаметра трубы, а с уменьшением конусного участка иглы существенно снижается усилие раздачи.

Цель работы – установление связи напряженно-деформированного состояния и образования дефекта типа «продольные трещины» на ЛБТ с наружными концевыми утолщениями.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования выбраны трубы $d152 \times 170 \times 143$ мм с наружными концевыми утолщениями из сплава Д16Т (рис. 1).

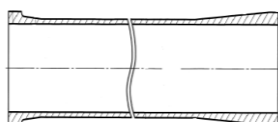


Рис. 1. Труба с наружными концевыми утолщениями
Fig. 1. Pipe with external end thickenings

Для проведения исследования произведена выборка из 100 труб, изготовленных по следующей технологии прессования: температура заготовки – 410°C , контейнера, матрицы и пресс-шайбы – 390°C , иглы – 370°C ; исходная заготовка – полый цилиндр наружным диаметром 362 мм, внутренним диаметром 150 мм, длиной 330 мм; диаметр контейнера 370 мм; скорость движения пуансона во время прессования концевого утолщения – 1,0 мм/с, во время прессования основного сечения – 1,6 мм/с; прессование со смазкой матрицы, втулки контейнера и иглы; коэффициент вытяжки λ при прессовании концевых утолщений равен 13,39, при прессовании основного сечения – 34,13.

По результатам визуального контроля исследуемой выборки труб непосредственно после процесса прессования у 10 шт. (10% от выборки) из них на наружной поверхности в концевых утолщениях и

переходных зонах от утолщения к основному сечению выявлены продольные трещины. Специально отметим, что продольные трещины чаще наблюдались на выходном конце. В основном сечении данный дефект не обнаружен. Внутренняя поверхность труб также не имеет продольных трещин.

На рис. 2 представлен возможный вид дефекта в виде продольных трещин на наружной поверхности трубы в зоне концевого утолщения и переходной зоне от утолщения к основному сечению.

Расчетная часть

Отметим, что на возникновение наружных поверхностных дефектов труб, в том числе и продольных трещин, влияет множество факторов, например химический состав сплава, наличие газовых пузырей, неметаллических включений, интерметаллидных включений и другие дефекты литья [22]. Однако в рамках данной работы принято решение установить связь напряженно-деформированного состояния и образования продольных трещин, выявленных в условиях реального производства, посредством моделирования процесса прессования согласно производственным условиям в программном комплексе DEFORM-2D.

В качестве материала заготовки согласно реальным условиям назначен сплав Д16. Граничные условия трения заданы законом Зибеля (показатель трения на контактной поверхности заготовка – контейнер 0,3, заготовка – игла 0,3, заготовка – матрица 0,3, заготовка – пресс-шайба 0,6). Скоростные условия процесса заданы с опорой на условия реального процесса. Постановка задачи осесимметричная и неизотермическая (температура окружающей среды при выходе из матрицы – 20°C ; коэффициент конвекции в окружающую среду – $0,02 \text{ Н/с/мм}^\circ\text{C}$; коэффициент теплопередачи – $11 \text{ Н/с/мм}^\circ\text{C}$). Температура заготовки и инструмента соответствует условиям реального процесса (описана выше).



а



б



в

Рис. 2. Общий вид концевого утолщения (а), возможный вид дефекта в виде продольной трещины на наружной поверхности трубы в переходной зоне от утолщения к основному сечению (б) и в зоне концевого утолщения (в)

Fig. 2. General view of the end thickening (a); possible defect in the form of a longitudinal crack on the outer surface of the pipe in the transition zone from the thickened section to the main section (б) and in the end-thickening zone (в)

На **рис. 3** представлена исходная сборка инструмента и заготовки (здесь и далее на рисунках показана верхняя половина очага деформации). Присвоим этому варианту моделирования № 1.

На **рис. 4** показаны стадии прессования ЛБТ с наружными концевыми утолщениями.

Здесь специально отметим, что игла для прессования трубы имеет различные диаметры по своей длине. При прессовании выходного концевой утолщения (**рис. 4, а**) на уровне калибрующего пояса матрицы игла имеет свой малый диаметр, при этом ее передняя часть (**зона А**) имеет большой диаметр, и выходящая из очага деформации (ОД) труба при прохождении через этот участок (**зона А**) раздается. При дальнейшем движении пресс-штемpera вместе с иглой вперед в ОД постепенно начинает устанавливаться большой диаметр иглы, при этом происходит прессование переходной зоны от утолщения к основному сечению трубы (**рис. 4, б**). После раздачи металла на конической части иглы формируется переходная зона

трубы с плавно уменьшающейся толщиной стенки. Далее в ОД устанавливается большой диаметр иглы и формируется основное сечение трубы (**рис. 4, в**). Для формирования заднего концевой утолщения игла в ОД вновь устанавливается на уровень своего малого диаметра (**рис. 4, г**). Таким образом, внутренний диаметр трубы постоянен и равен большому диаметру иглы.

Известно, что продольные трещины возникают из-за тангенциальных растягивающих напряжений. Поэтому далее рассмотрено распределение тангенциальных напряжений ($\sigma_{\text{фр}}$) в ОД при прессовании различных зон. Обозначим выходное концевой утолщение – зона 1, переходную зону от выходного концевой утолщения к основному сечению – зона 2, основное сечение – зона 3, утяжинное концевой утолщение – зона 4.

На **рис. 5** для примера показано распределение тангенциальных напряжений в ОД при прессовании зон 1 и 2 соответственно.

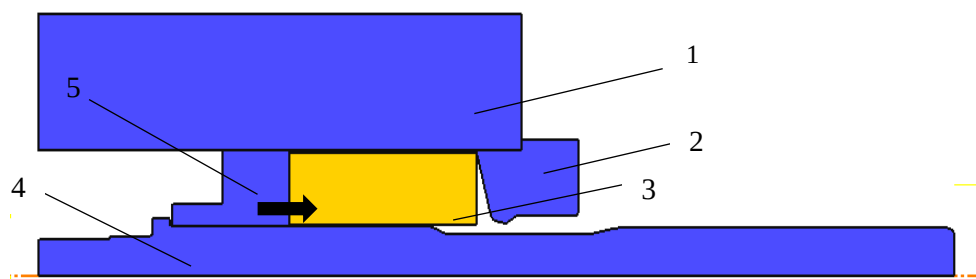


Рис. 3. Исходная сборка инструмента и заготовки: 1 – контейнер; 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – игла; 5 – пресс-штемпер (стрелкой показано направление движения прессового инструмента)

Fig. 3. Initial assembly of the tooling and billet: 1 is container, 2 is die, 3 is billet, 4 is mandrel, 5 is extrusion stem (the arrow indicates the direction of movement of the extrusion tooling)

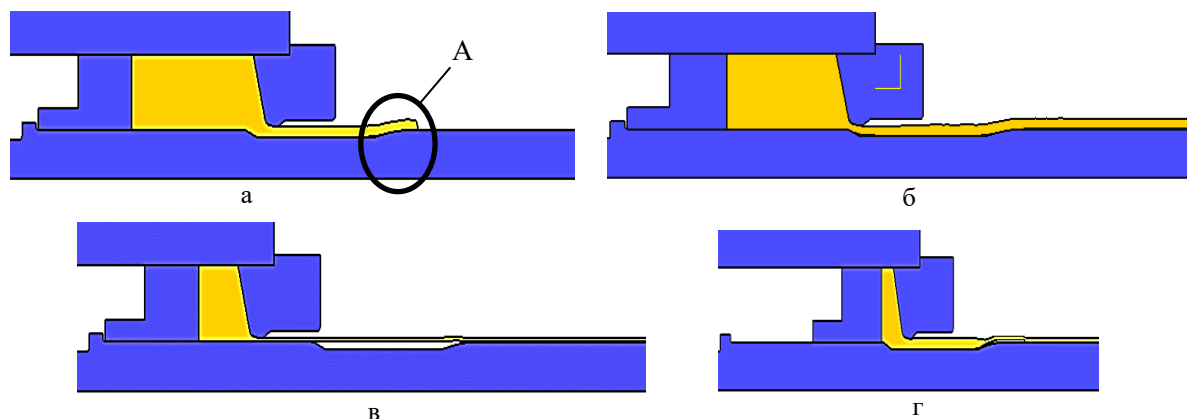


Рис. 4. Стадии прессования ЛБТ с наружными концевыми утолщениями: а – прессование выходного концевой утолщения (зона А – зона раздачи); б – прессование переходной зоны от выходного концевой утолщения к основному сечению; в – прессование основного сечения; г – прессование утяжинного концевой утолщения

Fig. 4. Stages of extrusion of light-alloy drill pipes with external end thickenings: а is extrusion of the outlet end thickening (zone A – expansion zone); б is extrusion of the transition zone from the outlet end thickening to the main section; в is extrusion of the main section; г is extrusion of the swaged end thickening

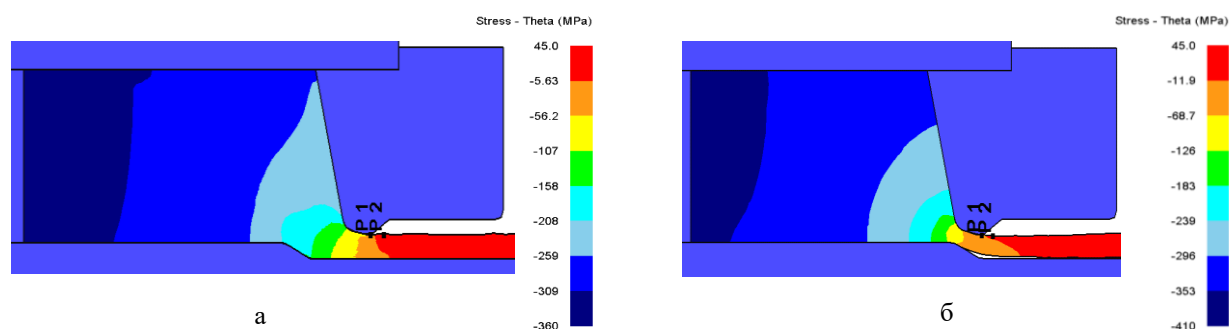


Рис. 5. Распределение тангенциальных напряжений в ОД при прессовании зоны 1 (а) и зоны 2 (б)
Fig. 5. Distribution of tangential stresses in the deformation zone during extrusion of zone 1 (a) and zone 2 (б)

Для удобства определения конкретных значений тангенциальных напряжений на наружной поверхности трубы назначены контрольные точки P1-P2, при этом P1 – в зоне калибрующего пояса матрицы, P2 – в зоне выхода трубы из калибрующего пояса матрицы.

В табл. 1 показаны значения тангенциальных напряжений в контрольных точках P1 и P2 в зонах 1-4 исследуемой трубы.

Здесь видно, что в точке P1 во всех зонах значения тангенциальных напряжений имеют отрицательные значения (сжимающие напряжения), причем в зоне 3 значения $\sigma_{\text{фр}}$ максимальны по модулю. По сравнению с зоной 3 уровень напряжений (по модулю) зоны 1 на 44,1% ниже, зоны 2 – на 54,5% ниже, зоны 4 – на 38,6% ниже.

В точке P2 во всех зонах $\sigma_{\text{фр}}$ имеют положительные значения (растягивающие напряжения), причем в зоне 3 уровень растягивающих напряжений в 9,7 раза ниже, чем в зоне 1, в 2,2 раза ниже, чем в зоне 2, в 4,3 раза ниже, чем в зоне 4. Отметим, что уровень растягивающих тангенциальных напряжений в зоне 4 в 2,2 раза ниже, чем в зоне 1. Здесь можно сделать вывод, что вследствие наличия повышенного уровня тангенциальных растягивающих напряжений зоны 1, 2 и 4 являются

опасными с позиции трещинообразования, причем зона 1 в большей степени.

Также опасным с позиции трещинообразования при прессовании данной трубы является процесс ее раздачи на конусном участке прессовой иглы. На рис. 6 показано распределение тангенциальных напряжений на трех условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1).

Здесь специально для оценки конкретных значений тангенциальных напряжений назначены контрольные точки. Далее в табл. 2 показаны значения $\sigma_{\text{фр}}$ в контрольных точках на первой, второй и третьей условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1).

На всех стадиях раздачи наблюдаются зоны растягивающих и сжимающих тангенциальных напряжений по толщине стенки трубы. Здесь важно отметить: от первой к третьей стадии раздачи уровень растягивающих напряжений в контрольных точках становится ниже по модулю, а уровень сжимающих напряжений – выше; передний торец трубы на первой стадии раздачи (рис. 6, а) имеет растягивающие тангенциальные напряжения как во внутреннем слое трубы, так и в наружном (точки P1-P2), однако уровень растягивающих напряжений наружного слоя на 12% выше, чем внутреннего.

Таблица 1. Значения тангенциальных напряжений в контрольных точках P1 и P2 в зонах 1-4 исследуемой трубы
Table 1. Tangential stress values at control points P1 and P2 in zones 1-4 of the investigated pipe

$\sigma_{\text{фр}}$ в P1, МПа (зона 1)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P2, МПа (зона 1)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P1, МПа (зона 2)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P2, МПа (зона 2)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P1, МПа (зона 3)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P2, МПа (зона 3)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P1, МПа (зона 4)	$\sigma_{\text{фр}}$ в P2, МПа (зона 4)
-22,1	16,5	-18,0	3,8	-39,6	1,7	-24,3	7,3

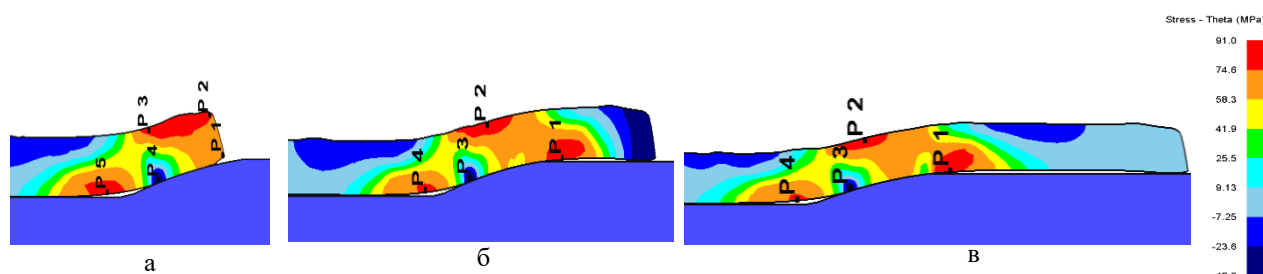


Рис. 6. Распределение тангенциальных напряжений на первой (а), второй (б) и третьей (в) условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1)

Fig. 6. Distribution of tangential stresses at the first (a), second (б), and third (в) conventional stages of expansion of the deformed pipe (for zone 1)

Таблица 2. Значения $\sigma_{\text{фф}}$ в контрольных точках на первой, второй и третьей условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1)

Table 2. Values of $\sigma_{\text{фф}}$ at the control points at the first, second, and third conventional stages of expansion of the deformed pipe (for zone 1)

Первая стадия раздачи				
$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P3, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P4, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P5, МПа
72,1	81,8	80,6	-26,6	87,5
Вторая стадия раздачи				
$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P3, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P4, МПа	
79,2	79,6	-30,5	77,6	
Третья стадия раздачи				
$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P3, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P4, МПа	
78,1	78,4	-33,5	73,8	

Также осуществлена оценка тангенциальных напряжений в момент раздачи трубы при формировании зоны 4. Установлено, что в этом случае раздача происходит при меньшем уровне растягивающих $\sigma_{\text{фф}}$ в сравнении с зоной 1. Для примера на рис. 7 приведена стадия раздачи при формировании зоны 4, примерно соответствующая второй стадии при формировании зоны 1 (рис. 6, б).

Сравнивая стадии раздачи, показанные на рис. 6, б и 7, установлено, что распределение $\sigma_{\text{фф}}$ и значения

сжимающих $\sigma_{\text{фф}}$ аналогичны, при этом значения растягивающих $\sigma_{\text{фф}}$ при формировании зоны 4 в среднем на 15% ниже. Можно сделать вывод, что передний торец трубы, в большей степени наружная поверхность трубы, является наиболее опасной зоной с позиции трещинообразования.

Также рассмотрены четыре условные стадии раздачи при прессовании зоны 2 деформируемой трубы (рис. 8).

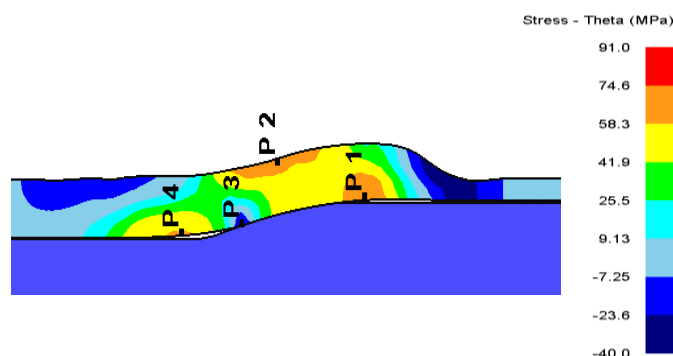


Рис. 7. Стадия раздачи при формировании зоны 4, примерно соответствующая второй стадии при формировании зоны 1

Fig. 7. Expansion stage during the formation of zone 4, approximately corresponding to the second stage during the formation of zone 1

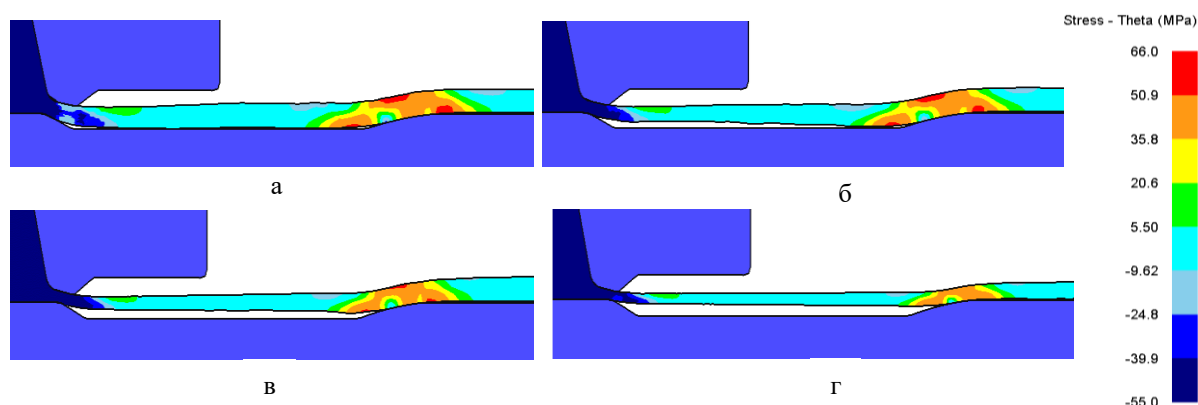


Рис. 8. Распределение тангенциальных напряжений на первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 2)

Fig. 8. Distribution of tangential stresses at the first (a), second (б), third (в), and fourth (г) conventional stages of expansion of the deformed pipe (for zone 2)

Здесь видно формирование переходной зоны трубы от наружного концевой утолщения к основному сечению с плавным уменьшением толщины стенки трубы. Установлено, что максимальные растягивающие тангенциальные напряжения от первой к четвертой стадии понижают свой уровень в 1,8 раза (с 66 до 36 МПа), то есть вероятность появления трещин понижается. Следует специально отметить, что после окончания раздачи зоны 2 наступает прессование зоны 3, где раздача трубы не происходит, а уровень тангенциальных напряжений трубы после выхода из ОД находится на уровне нуля, то есть возникновение трещин вследствие действия тангенциальных напряжений здесь невозможно.

Как уже было отмечено, на формирование трещин также влияет пластичность сплава, одним из влияющих факторов на которую является температура. Известно, что для сплава Д16 наибольшая пластичность находится в интервале температур 400-480°C, а при 490°C начинается ее снижение [23].

Отметим, что на температурное поле имеет влияние скорость истечения, связанная со скоростью прессования соотношением $V_{ист} = \lambda V_{пресс}$. Кроме того, скорость истечения прямо пропорционально связана со скоростью деформации ξ , на последнюю при этом имеет влияние коэффициент вытяжки – с его увеличением значение скорости деформации повышается. Высокие скорости перемещения металла в пластической зоне могут вызвать значительное увеличение температуры [24].

Известно, что на скорость деформации также влияют, например, значение показателя трения в процессе деформации и длина заготовки, оставшаяся в контейнере на момент оценки скорости деформации

[25]. Однако в условиях данной работы принято упрощение и рассматривается только совместное влияние скорости прессования, коэффициента вытяжки и температуры.

Далее рассмотрено распределение скорости деформации и температуры в исследуемых зонах трубы. На рис. 9 для примера показано распределение скорости деформации при прессовании зон 1 и 2 соответственно, и для оценки конкретных значений ξ для всех рассматриваемых зон назначены контрольные точки Р1 и Р2, где точка Р1 примыкает к наружной поверхности трубы, Р2 – к внутренней.

В табл. 3 показаны значения скорости деформации в контрольных точках Р1 и Р2 и максимальное значение температуры в ОД в зонах 1-4 исследуемой трубы.

Установлено, что увеличение скорости прессования и коэффициента вытяжки при прессовании зоны 3 в сравнении с зонами 1 и 4 привело к значительному увеличению скорости деформации (в 6 раз), что, в свою очередь, привело к значительному разогреву металла в ОД. Специально отметим, что температура металла в ОД превысила свое максимально допустимое значение в известном интервале пластичности для сплава Д16. Можно предположить, что наиболее опасной с позиции разрушения становится зона 3, однако вследствие ее благоприятного напряженного состояния, а также высокого значения коэффициента вытяжки (известно, что при λ , равном 30 и более, для сплава Д16 может произойти рекристаллизация и снятие структурного эффекта) негативное влияние скорости деформации и температуры сводится к минимуму, что подтверждается в условиях реального производства отсутствием в данной зоне дефектов в виде трещин.

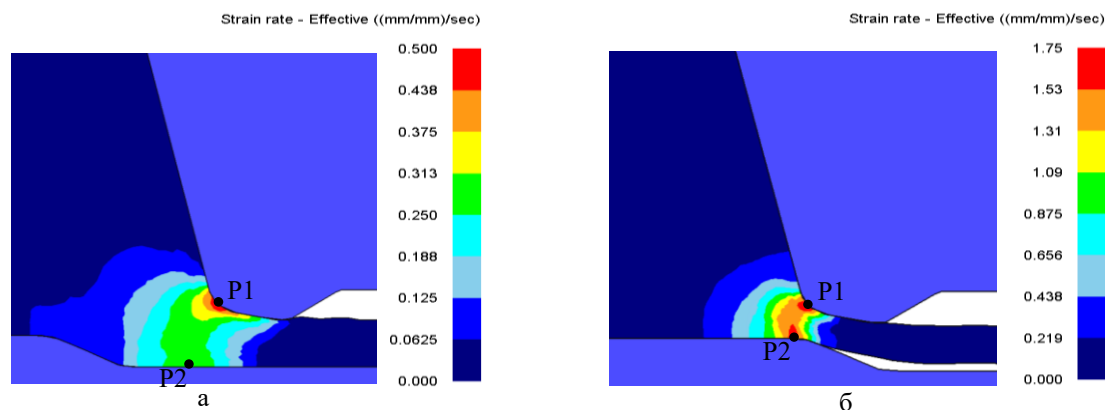


Рис. 9. Распределение скорости деформации при прессовании зоны 1 (а) и 2 (б)

Fig. 9. Distribution of strain rate during extrusion of zones 1 (a) and 2 (б)

Таблица 3. Значения скорости деформации в контрольных точках Р1 и Р2 и максимальное значение температуры в ОД в зонах 1-4 исследуемой трубы

Table 3. Strain rate values at control points P1 and P2 and the maximum temperature in the deformation zone in zones 1-4 of the investigated pipe

ξ в Р1, с ⁻¹ (зона 1)	ξ в Р2, с ⁻¹ (зона 1)	ξ в Р1, с ⁻¹ (зона 2)	ξ в Р2, с ⁻¹ (зона 2)	ξ в Р1, с ⁻¹ (зона 3)	ξ в Р2, с ⁻¹ (зона 3)	ξ в Р1, с ⁻¹ (зона 4)	ξ в Р2, с ⁻¹ (зона 4)
0,5	0,25	1,75	1,75	3	2,12	0,5	0,23
Максимальная температура в ОД, °С							
зона 1		зона 2		зона 3		зона 4	
450		470		500		470	

При прессовании зон 1 и 4 значения скорости прессования и коэффициента вытяжки находятся на одном уровне, при этом максимальное значение скорости деформации также находится на одном уровне. Оценивая расположение максимума скорости деформации (рис. 9, а), можно предположить наибольшее упрочнение наружной поверхности трубы, что является негативным с позиции разрушения. Специально отметим, что трещины в условиях реального производства выявлены именно на наружной поверхности концевых утолщений труб. Также установлено, что температура металла при прессовании данных зон попадает в интервал пластичности, поэтому с этой позиции опасность разрушения здесь минимальна.

При прессовании зоны 2 появляется два локальных максимума скорости деформации (рис. 9, б), в отличие от остальных зон, где он один. В момент прессования этого участка по условиям моделирования скорость прессования еще не увеличена до скорости прессования основного сечения, таким образом, повышение скорости деформации относительно зон 1 и 4 (в 3,5 раза) произошло за счет постепенного уменьшения диаметра трубы (увеличения коэффициента вытяжки). Оценивая расположение скорости деформации, можно предположить значительное упрочнение как наружной, так и внутренней поверхности трубы, что является негативным с позиции разрушения. Однако, вследствие благоприятного напряженного состояния внутренней поверхности трубы, опасной зоной остается наружная поверхность. Специально отметим отсутствие дефектов в виде трещин на внутренней поверхности данного участка и их наличие на наружной (в производственных условиях). Также установлено, что температура металла при прессовании данной зоны попадает в интервал пластичности, поэтому с этой позиции опасность разрушения здесь минимальна.

Также определена максимальная скорость деформации при раздаче для зон 1, 2 и 4. Значение ее

максимума варьируется от 0,07 до 0,11 с⁻¹. Эти значения достаточно низкие для проявления существенно негативного влияния скорости деформации. К тому же температура металла в зоне раздачи всегда находится в интервале пластичности.

С целью поиска более рациональных с позиции минимизации появления трещин параметров процесса осуществлен вариант моделирования при понижении температуры заготовки до 390°C, контейнера, матрицы и пресс-шайбы до 370°C, иглы до 350°C. Данному варианту решения присвоен № 2. Также осуществлен вариант моделирования № 3, где понижено значение скорости движения пуансона во время прессования концевых утолщений до 0,6 мм/с, во время прессования основного сечения – до 1,2 мм/с. В варианте моделирования № 4 понижены вышеуказанные температурные и скоростные параметры.

В табл. 4 показаны значения тангенциальных напряжений в контрольных точках P1 и P2 (расположение точек аналогично рис. 5) в зонах 1-4 исследуемой трубы по результатам решений № 2-4.

Здесь видно, что условия процесса № 2 имеют меньшее влияние на уровень тангенциальных напряжений в контрольных точках исследуемых зон по сравнению с вариантом процесса № 3. При этом наиболее действенным вариантом благоприятной коррекции тангенциальных напряжений является одновременное понижение температурных и скоростных условий процесса (вариант процесса № 4). Исходя из последнего, принято решение сравнить значения тангенциальных напряжений в зоне раздачи для первой зоны трубы в вариантах процесса № 1 и 4. Значения $\sigma_{\text{фф}}$ в контрольных точках на первой и третьей условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1) в варианте процесса № 4 показаны в табл. 5. Для примера сравнение осуществлено для первой и третьей условных стадий раздачи, расположение контрольных точек соответствует рис. 6.

Таблица 4. Значения тангенциальных напряжений в контрольных точках P1 и P2 в зонах 1-4 исследуемой трубы по результатам решений № 2-4

Table 4. Tangential stress values at control points P1 and P2 in zones 1-4 of the investigated pipe based on the results of Solutions No. 2-4

Номер решения	$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа (зона 1)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа (зона 1)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа (зона 2)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа (зона 2)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа (зона 3)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа (зона 3)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа (зона 4)	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа (зона 4)
2	-35,4	10,2	-22,2	2,2	-50,3	-0,2	-33,8	4,8
3	-44,6	6,1	-29,8	1,4	-64,5	-2,2	-46,5	2,7
4	-55,6	0,5	-35,6	0,1	-86,5	-6,2	-56,2	0,3

Таблица 5. Значения $\sigma_{\text{фф}}$ в контрольных точках на первой и третьей условных стадиях раздачи деформируемой трубы (для зоны 1) в четвертом варианте процесса

Table 5. Values of $\sigma_{\text{фф}}$ at the control points at the first and third conventional stages of expansion of the deformed pipe (for zone 1) for the fourth process variant

Номер стадии раздачи	$\sigma_{\text{фф}}$ в P1, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P2, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P3, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P4, МПа	$\sigma_{\text{фф}}$ в P5, МПа
1	58,3	61,5	62,8	-38,8	67,6
3	61,5	62,3	-45,6	58,4	

Установлено, что вариант процесса № 4 по сравнению с № 1 на вышеуказанных стадиях раздачи также имеет более благоприятный уровень тангенциальных напряжений с позиции минимизации образования продольных трещин.

Далее в условиях реального производства принято решение осуществить прессование труб при температурно-скоростных параметрах процесса, соответствующих варианту процесса № 4. В результате отпрессовано 80 шт. труб, при этом на 3,75% из них выявлены продольные трещины. Таким образом, температурно-скоростной режим процесса № 4 обеспечил в условиях реального производства снижение процента брака по продольным трещинам в 2,6 раза.

Заключение

В результате промышленного прессования легкосплавных буровых труб с наружными концевыми утолщениями выявлено появление дефекта типа «продольные трещины» на их наружной поверхности в концевых утолщениях и переходных зонах от утолщения к основному сечению.

Установлено, что одной из причин образования выявленных в условиях реального процесса продольных трещин является неблагоприятный уровень тангенциальных растягивающих напряжений как в очаге деформации, так и в зоне раздачи. Дополнительное негативное влияние на концевые утолщения может оказывать повышенное значение скорости деформации, характерное для области, примыкающей к наружной поверхности трубы.

Установлено, что понижение температуры металла заготовки и прессового инструмента на 20°C и скорости движения инструмента на 0,4 мм/с способствует более благоприятному с позиции трещинообразования распределению тангенциальных напряжений, в том числе в зонах обнаружения трещин. Корректировка температурно-скоростных условий процесса на практике привела к уменьшению процента несоответствующей продукции по дефекту «продольные трещины».

Список источников

1. Прохоров С. Алюминий возвращается // Нефть России. 2011. № 6. С. 76-77.
2. Aluminium Drill pipe in an Arctic Application – A Well-known Tool Changing the Development Strategy / Vakhrushev A.V., Gelfgat M.Ya., Basovich D.V., Buyanovskiy I.N. // SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition, Moscow, 2011, 149707. DOI: 10.2118/149707-MS
3. Aluminum Alloy Tubules – Assessment for Ultra long Well Construction / Gelfgat M.Ya., Basovich V.S., Adelman A., Hansen B.R. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, 2007, 109722. DOI: 10.2523/109722-MS
4. Швецов О.В. Повышение эксплуатационной надежности буровых труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 236-426.
5. Сапунжи В.В. Эффективность применения алюминиевых буровых труб при бурении скважин на нефть и газ // Бурение и нефть. 2012. № 6-7. С. 48-52.
6. Файн Г.М., Штамбург В.Ф., Даниелянц С.М. Нефтяные трубы из легких сплавов. М.: Недра, 1990. 221 с.
7. Файн Г.М., Макаров Е.М. Состояние и перспективы производства и применение труб нефтепромыслового сортамента из алюминиевых сплавов // Территория Нефтегаз. 2007. № 5. С. 66-71.
8. Ерманок М.З., Каган Л.С., Головинов М.Ф. Прессование труб из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1976. 428 с.
9. Каган Л.С., Ерманок М.З., Ерохов В.К. Прогрессивная технология прессования буровых труб переменного сечения из алюминиевых сплавов. М.: Изд-во Ин-та «Цветметобработка», 1969. 48 с.
10. Применение термомеханической обработки для повышения прочности прессованных прутков из алюминиевого сплава Д16 / Н.Б. Пугачева, А.В. Разинкин, И.С. Каманцев и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2025. № 1. С. 64-73.
11. Кутепова Л.В., Волгина Н.И., Хламкова С.С. Исследование влияния термической обработки на структуру и свойства алюминиевого сплава Д16 // Технология металлов. 2022. № 7. С. 2-7.
12. Kondrat'ev S.Y., Zotov O.G., Shvetsov O.V. Structural stability and variation of properties of aluminum alloys D16 and 1953 in production and operation of drill pipes // Metal Science and Heat Treatment. 2014, vol. 55, pp. 526-532.
13. Микляев П.Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением: справочник. М.: Металлургия, 1994. 279 с.
14. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. М.: Металлургия, 1975. 447 с.
15. Влияние напряженного состояния на образование трещин в протекторном утолщении при прессовании легкосплавной трубы / Ю.В. Замараева Ю.В., Ю.Н. Логинов, О.Ф. Дегтярева и др. // Металлообработка. 2025. № 5. С. 27-36.
16. Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В. Изучение напряженно-деформированного состояния для предупреждения образования продольных трещин в прессованных трубах // Цветные металлы. 2010. № 5. С. 119-122.
17. Каранашев Р.А. Совершенствование процесса производства буровых труб из алюминиевых сплавов: автореф. ... дис. канд. техн. наук. М., 1993. 24 с.
18. Каган Л.С. Разработка научных основ прессования с раздачей и технологии производства труб переменного сечения из алюминиевых сплавов: автореф. ... дис. канд. техн. наук. М., 1992. 36 с.
19. Непершин Р.И. Раздача тонкостенной трубы криволинейным жестким пуансоном // Вестник МГТУ Станкин. 2009. № 4. С. 54-60.
20. Каргин В.Р., Афанасьев А.Е., Каргин Б.В. Моделирование процесса прессования буровых труб с наружными утолщениями // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. № 1-2. С. 215-219.
21. Афанасьев А.Е., Каргин В.Р., Каргин Б.В. Компьютерный анализ процесса раздачи труб прессованием // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. № 2. С. 97-106.

22. Ежов А.А., Герасимова Л.П. Дефекты в металлах. М.: Русский университет, 2002. 359 с.
23. Тофпенет Р.Л., Анисович А.Г., Василбева Л.А. Исследование возможности повышения пластичности литого сплава Д16 // Литье и металлургия. 2002. № 3. С. 30-34.
24. Зимин Л.С., Федотов М.Е. Учёт процессов деформации в технологических комплексах «индукционный нагрев-обработка давлением» // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. 2005. № 37. С. 50-54.
25. Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В. О скоростных режимах деформирования в контейнере при прямом пресовании // Технология легких сплавов. 2010. № 4. С. 66-72.
12. Kondratev S.Y., Zotov O.G., Shvetsov O.V. Structural stability and variation of properties of aluminum alloys D16 and 1953 in production and operation of drill pipes. *Metal Science and Heat Treatment*. 2014;55:526-532.
13. Miklyaev P.G. *Mekhanicheskie svoistva legkikh spлавov pri temperaturakh i skorostyakh obrabotki davleniem: spravochnik* [Mechanical properties of light alloys at temperatures and pressure treatment rates: reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 279 p. (In Russ.)
14. Perlin I.L., Raitbarg L.Kh. *Teoriya pressovaniya metallov* [Theory of metal extrusion]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 447 p. (In Russ.)
15. Zamaraeva Yu.V., Loginov Yu.N., Degtyareva O.F. et al. Influence of stress state on cracks formation in protector thickening at light alloy pipe extrusion. *Metalloobrabotka* [Metalworking]. 2025;(5):27-36. (In Russ.)
16. Loginov Yu.N., Antonenko L.V. Research of the strain-stress state for the prevention of longitudinal splits formation in the extruded pipes. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. 2010;(5):119-122. (In Russ.)
17. Karanashev R.A. *Sovershenstvovanie protsessa proizvodstva buril'nykh trub iz alyuminievykh spлавov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the production process of aluminum alloy drill pipes. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 1993, 24 p.
18. Kagan L.S. *Razrabotka nauchnykh osnov pressovaniya s razdachey i tekhnologii proizvodstva trub peremennogo secheniya iz alyuminievykh spлавov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of scientific foundations extrusion with distribution and technology of production of pipes of variable cross-section from aluminum alloys. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 1992, 36 p.
19. Nepershin R.I. Thin-walled tube extension by curved rigid punch. *Vestnik MGTU Stankin* [Bulletin of MSTU Stankin]. 2009;(4):54-60. (In Russ.)
20. Kargin V.R., Afanasyev A.E., Kargin B.V. Modeling the process of boring pipes with the external thickening pressings. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2016;(1-2):215-219. (In Russ.)
21. Afanasyev A.E., Kargin V.R., Kargin B.V. Computer analysis of distribution tubes pressing. *Internet-zhurnal Naukovedenie* [Online Journal of Science Studies]. 2016;(2):97-106. (In Russ.)
22. Ezhov A.A., Gerasimova L.P. *Defekty v metallakh* [Defects in metals]. Moscow: Russkiy universitet, 2002, 359 p. (In Russ.)
23. Toфpenets R.L., Anisovich A.G., Vasilbeva L.A. Investigation of the possibility of increasing the plasticity of cast alloy D16. *Litie i metallurgiya* [Casting and metallurgy]. 2002;(3):30-34. (In Russ.)
24. Zimin L.S., Fedotov M.E. Consideration of deformation processes in technological complexes "induction heating-pressure processing". *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: technical sciences]. 2005;(37):50-54. (In Russ.)
25. Loginov Yu.N., Antonenko L.V. On strain rate conditions in the container during direct extrusion. *Tekhnologiya legkikh spлавov* [Technology of Light Alloys]. 2010;(4):66-72. (In Russ.)

References

1. Prokhorov S. Aluminum is coming back. *Neft Rossii* [Russian Oil]. 2011;(6):76-77. (In Russ.)
2. Vakhrushev A.V., Gelfgat M.Ya., Basovich D.V., Buyanovskiy I.N. Aluminium Drill pipe in an Arctic Application – A Well-known Tool Changing the Development Strategy. SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition. Moscow, 2011, 149707. DOI: 10.2118/149707-MS
3. Gelfgat M.Ya., Basovich V.S., Adelman A., Hansen B.R. Aluminum Alloy Tubules – Assessment for Ultra long Well Construction. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Anaheim, 2007, 109722. DOI: 10.2523/109722-MS
4. Shvetsov O.V. Improving the operational reliability of drill pipes of aluminium alloys D16T and 1953T1. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [Scientific-technical statement of SPbPU]. 2017;23(1):236-426. (In Russ.)
5. Sapunzhi V.V. Use efficiency of aluminium drill pipes during oil and gas wells' drilling. *Burenie i neft* [Drilling and oil]. 2012;(6-7):48-52. (In Russ.)
6. Fain G.M., Shtamburg V.F., Danelyants S.M. *Neftyanye truby iz legkikh spлавov* [Light alloy oil pipes]. Moscow: Nedra, 1990, 221 p. (In Russ.)
7. Fain G.M., Makarov E.M. The state and prospects of production and application of oilfield grade pipes made of aluminum alloys. *Territoriya Neftegaz* [Neftegaz Territory]. 2007;(5):66-71. (In Russ.)
8. Ermanok M.Z., Kagan L.S., Golovinov M.F. *Pressovanie trub iz alyuminievykh spлавov* [Extrusion of aluminum alloy pipes]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 248 p. (In Russ.)
9. Kagan L.S., Ermanok M.Z., Erokhov V.K. *Progressivnaya tekhnologiya pressovaniya buril'nykh trub peremennogo secheniya iz alyuminievykh spлавov* [Advanced technology of extrusion drill pipes of variable cross-section made of aluminum alloys]. Moscow: Tsvetmetobrabotka Publishing House, 1969, 48 p. (In Russ.)
10. Pugacheva N.B., Razinkin A.V., Kamantsev I.S. et al. Application of thermomechanical treatment to increase the strength of extruded rods made of aluminum D16 alloy. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals]. 2025;(1):64-73. (In Russ.)
11. Kutepova L.V., Volgina N.I., Khlamkova S.S. Influence study of heat treatment on structure and properties of alumina alloy D16. *Tekhnologiya metallov* [Metal technology]. 2022;(7):2-7. (In Russ.)

Поступила 26.01.2026; принята к публикации 20.02.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 26/01/2026; revised 20/02/2026; published 30/09/2026

Замараева Юлия Валентиновна – кандидат технических наук, научный сотрудник,
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия;
начальник отдела,
АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия.
Email: zamaraevajulia@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2620-7064

Логинов Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник,
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия;
профессор кафедры обработки металлов давлением,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: j.n.loginov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5874-5422

Дегтярева Ольга Федоровна – кандидат технических наук,
заместитель генерального директора по технологии и качеству,
ООО «Бурильные трубы», Каменск-Уральский, Россия.
Email: DegtyarevaOF@kumw.ru.

Разинкин Александр Викторович – кандидат технических наук, директор по производству,
АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия.
Email: RazinkinAV@kumz.ru. ORCID 0009-0006-2851-227X

Yuliya V. Zamaraeva – PhD (Eng.), Researcher,
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia;
Head of Department,
JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia.
Email: zamaraevajulia@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2620-7064

Yuriy N. Loginov – DrSc (Eng.), Professor, Leading Researcher,
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia;
Professor of the Department of Pressure Metal Treatment,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.
Email: j.n.loginov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5874-5422

Olga F. Degtyareva – PhD (Eng.), Deputy General Director for Technology and Quality,
LTD Drill Pipes, Kamensk-Uralsky, Russia.
Email: DegtyarevaOF@kumw.ru.

Alexander V. Razinkin – PhD (Eng.), Production Director,
JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia.
Email: RazinkinAV@kumz.ru. ORCID 0009-0006-2851-227X