

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.771

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-61-70



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПЛИТ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК4-1Ч

Глинских П.И.^{1,2}, Замараева Ю.В.^{1,3}, Яковлев С.И.¹, Завалий Е.А.^{1,2}

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

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Катаные высокие плиты из сплава АК4-1ч являются одними из распространенных полуфабрикатов авиационного назначения. Одной из проблем их производства является низкий уровень относительного удлинения и неоднородность структуры в высотном направлении плиты. Цель данной работы – получение стабильного уровня механических свойств, а также повышение значений относительного удлинения и уменьшение неоднородности структуры в высотном направлении плит толщиной 40-80 мм из сплава АК4-1ч посредством корректировки режимов горячей прокатки в условиях АО «Каменск-Уральский металлургический завод». В результате исследования механических свойств плит толщиной 40-80 мм, изготовленных по традиционной технологии, выявлено, что средние значения прочностных свойств независимо от направления отбора образцов имеют значительный запас относительно требований стандарта. Средние значения относительного удлинения в поперечном и продольном направлениях для данных плит также имеют значительный запас. В высотном направлении среднее значение относительного удлинения превышает требование стандарта только на 20%. Посредством исследования макроструктуры образца с пониженным значением относительного удлинения в центре его поперечного сечения обнаружена светлая область. Посредством исследования микроструктуры данного образца установлено, что светлая область имеет более крупный размер зерна, чем периферия (разница 20%). Оптимизация горячей прокатки, а именно корректировка схемы обжатий и величины относительного обжатия в каждом проходе, привела к повышению уровня механических свойств плит, в том числе и относительного удлинения в высотном направлении, а также к уменьшению неоднородности структуры.

Ключевые слова: сплав АК4-1ч, прокатка плит, механические свойства, относительное удлинение, структура

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

© Глинских П.И., Замараева Ю.В., Яковлев С.И., Завалий Е.А., 2025

Для цитирования

Определение оптимальных режимов горячей прокатки плит из алюминиевого сплава АК4-1ч / Глинских П.И., Замараева Ю.В., Яковлев С.И., Завалий Е.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 61-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-61-70>



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

DETERMINATION OF THE OPTIMAL MODES FOR HOT ROLLING OF AK4-1CH ALUMINUM ALLOY PLATES

Glinskikh P.I., Zamaraeva Yu.V., Yakovlev S.I., Zavaliy E.A.

¹JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia

²Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

³M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Rolled high-strength plates made from AK4-1ch alloy are a common semi-finished product for aviation purposes. However, one of the challenges of their production is the low relative elongation level and structural heterogeneity in the height direction of the plates. The aim of this study is to achieve a stable level of mechanical properties while increasing the relative elongation and reducing structural heterogeneity in plates with a thickness between 40 and 80 millimeters made from the AK4-1ch alloy, by adjusting the hot rolling conditions at JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works. After examining the mechanical properties of plates with a thickness between 40 and 80 millimeters produced using traditional methods, it was found that the average strength values, regardless of sampling direction, significantly exceed the standard requirements. The average values of transverse and longitudinal elongation for these plates also show a significant margin. In terms of height, the average elongation value is only 20% above the standard requirement. By examining the macrostructure of a sample with reduced elongation, a light area was found in the center of its cross-section. Examining the microstructure, it was determined that the light area had a larger grain size compared to the periphery, with a difference of 20%. Optimization of hot rolling process, such as adjusting the compression scheme and relative compression in each pass, has led to an improvement in mechanical properties, including relative elongation in height, as well as a reduction in structural heterogeneity.

The research was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Keywords: AK4-1ch alloy, plate rolling, mechanical properties, relative elongation, structure

For citation

Glinskikh P.I., Zamaraeva Yu.V., Yakovlev S.I., Zavaliy E.A. Determination of the Optimal Modes for Hot Rolling of AK4-1CH Aluminum Alloy Plates. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 61-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-61-70>

Введение

В настоящее время с целью получения высококачественных изделий из алюминиевых сплавов актуальна оптимизация технологических режимов изготовления полуфабрикатов [1], при этом достаточно большая часть работ направлена на повышение уровня механических свойств и актуализацию производства полуфабрикатов из жаропрочного сплава АК4-1 и его модификаций (АК4-1ч, АК4-2ч и др.) [2–5], относящихся к системе Al–Cu–Mg–Fe–Ni, по химическому и фазовому составам близким к дуралюминам, но вместо марганца в качестве легирующего элемента содержат железо и никель.

Особенность АК4-1ч – способность работать длительное время при повышенных температурах и эксплуатационных нагрузках без существенной остаточной деформации и разрушения [6, 7]. Данный сплав обладает оптимальным комплексом механических, коррозионных и технологических свойств, а также ресурсных характеристик и применяется как основной конструкционный материал в виде листов, плит, поковок и штампов, а также прессованных профи-

лей в авиастроении и автомобильной промышленности (головки цилиндров, поршни и т.д.) [8–11].

Производство плит из сплава АК4-1ч регламентировано стандартом ОСТ 1 90117-83 [12]. Данный стандарт предусматривает производство плит толщиной от 11 до 100 мм.

Одной из особенностей производства плит из сплава АК4-1ч толщиной 40-80 мм в состоянии поставки Т1 в условиях АО «Каменск-Уральский металлургический завод» (АО «КУМЗ») является низкий уровень относительного удлинения в высотном направлении и неоднородность структуры по толщине плиты. Аналогичная тема, а именно ухудшение качества проработки массивных катаных плит из сплава АК4-1 по их толщине, поднята авторами работ [13, 14].

В работе [15] показана возможная причина вышеуказанной проблемы – структура исходной заготовки, обладающая измененным характером распределения частиц основной избыточной фазы Al₃FeNi в различных зонах по ее толщине. В центре по толщине заготовки существует локальная область зональной ликвации с пониженным содержанием легирующих компонентов и грубыми эвтектическими колониями

фазы Al₉FeNi, что обусловлено условиями охлаждения при ее литье. Эта структурная неоднородность наследуется катаной плитой и приводит к получению на ее макроструктуре в центре по толщине более светлой области с укрупненным зерном, что влечет за собой пониженный уровень механических свойств в центральной зоне плиты.

Цель данной работы – получение стабильного уровня механических свойств, а также повышение значений относительного удлинения в высотном направлении и уменьшение неоднородности структуры по толщине высоких плит из сплава АК4-1ч посредством корректировки режимов горячей прокатки в условиях АО «КУМЗ».

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования произведена выборка из 633 плит из сплава АК4-1ч, изготовленных в производственных условиях АО «КУМЗ» по технологической схеме, включающей в себя литье слитка, его гомогенизацию и резку на заготовки, их фрезерование, нагрев и горячую прокатку, термообработку плит на твердый раствор, правку растяжением и искусственное старение. Из 633 плит 251 – толщиной до 12–40 мм включительно, 372 плиты – толщиной 40–80 мм.

Химический состав сплава АК4-1ч, соответствующий ОСТ 1 90048-90 [16], представлен в табл. 1.

Выбор химического состава сделан на основе работы [17], где для получения высокого уровня механических свойств плит из АК4-1 рекомендовано обеспечивать содержание кремния не ниже 0,15%, а содержание железа и никеля поддерживать близким к 1,0% для каждого. При этом допускается превышение на 0,05–0,20% содержание железа над содержанием никеля.

Механические свойства, а именно временное сопротивление (σ_b), условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительное удлинение (δ) в долевом (L), поперечном (LT) и для плит толщиной свыше 40 мм высотном (ST) направлении, определены посредством испытания на растяжение образцов диаметром 5,0 мм и расчетной длиной $l_0 = 5d_0$. Для осуществления испытания по стандарту ГОСТ 1497-73 [18] использовали

Таблица 1. Химический состав сплава АК4-1ч, мас. %
Table 1. Chemical composition of AK4-1ch alloy, wt. %

Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	Ni	Другие элементы	Прочие элементы		Алюминий
								каждый	сумма	
0,15–0,25	0,9–1,2	1,9–2,7	1,3–1,8	max 0,10	0,04–0,10	0,9–1,2	-	max 0,05	max 0,15	основа

Таблица 2. Средние значения σ_b , $\sigma_{0,2}$ и δ в зависимости от толщины плиты и направления вырезки образцов
Table 2. Average values of σ_b , $\sigma_{0,2}$ and δ depending on the thickness of the plate and testing direction

Толщина плиты, мм	Направление вырезки образцов	σ_b , МПа	Требование ОСТ 1 90117, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Требование ОСТ 1 90117, МПа	δ , %	Требование ОСТ 1 90117, %
До 40 мм вкл.	L	433	410	392	315	11	6
	LT	434	390	380	325	9,7	6
Свыше 40 мм	L	420	410	394	315	10	6
	LT	425	390	386	325	8,9	6
	ST	401	375	380	295	4,8	4

универсальную испытательную машину INSTRON 5585H, оснащенную навесным и видеоэкстензометрами, гидравлическими захватами, устройствами для центрования захватов и программным обеспечением, позволяющим проводить испытания образцов из алюминиевых сплавов.

Анализ химического состава сплава проводился на оптико-эмиссионном спектрометре «SpectroLab» фирмы «Spectro».

Полученные результаты и их обсуждение

Средние значения временного сопротивления, условного предела текучести и относительного удлинения в зависимости от толщины плиты и направления вырезки образцов представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что средние значения вышеуказанных механических свойств для плит толщиной 12–40 мм включительно соответствуют требованиям [12], имея при этом технологический запас (для прочностных свойств превышение требований стандарта составляет 5,5–24%, для относительного удлинения – 61–83%). Для плит толщиной 40–80 мм независимо от направления вырезки образцов средние значения прочностных свойств также имеют технологический запас (2,5–28%). Средние значения относительного удлинения в направлении L и LT для данных плит имеют значительный запас относительно требований стандарта (48–66%), при этом в направлении ST среднее значение относительного удлинения является низким и превышает требования стандарта на 20%.

Дальнейшая работа направлена на повышение уровня относительного удлинения в высотном направлении плит толщиной 40–80 мм. В качестве объекта исследования выбрана плита из сплава АК4-1ч размером 70×1200×3000 мм в состоянии поставки Т1 с низким значением относительного удлинения.

Для определения причин низкого значения относительного удлинения в высотном направлении принято решение осуществить анализ макроструктуры исследуемой плиты.

Темплет для изучения макроструктуры, отобранный от вышеуказанной плиты, имеет размеры 70×50×250 мм. Схема отбора темплет для исследования макроструктуры представлена на рис. 1.

На макроструктуре темплет в центре поперечного сечения обнаружена светлая область (рис. 2).

Следующим этапом осуществлен анализ микроструктуры исследуемой плиты (схема отбора темплет соответствует рис. 1, размеры образца 70×50×50 мм). Исследование микроструктуры темплет осуществлено на уровне $\frac{1}{4}$ (рис. 3, а) и $\frac{1}{2}$ (рис. 3, б) его толщины.

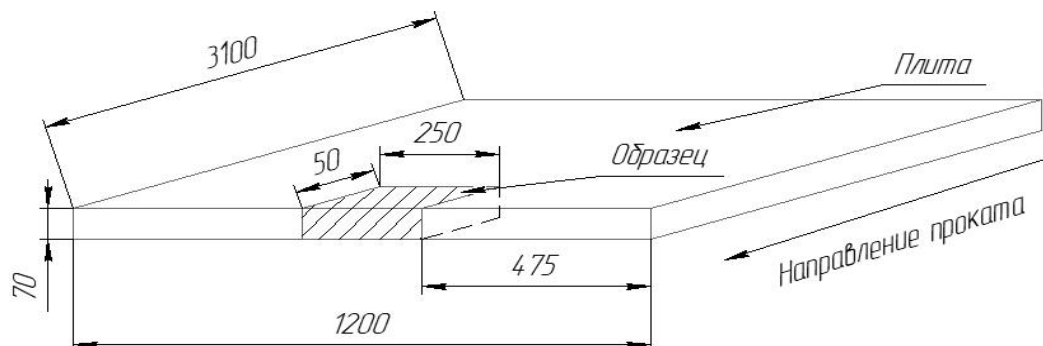


Рис. 1. Схема отбора образца для исследования макроструктуры
Fig. 1. Sample preparation scheme for macrostructure study

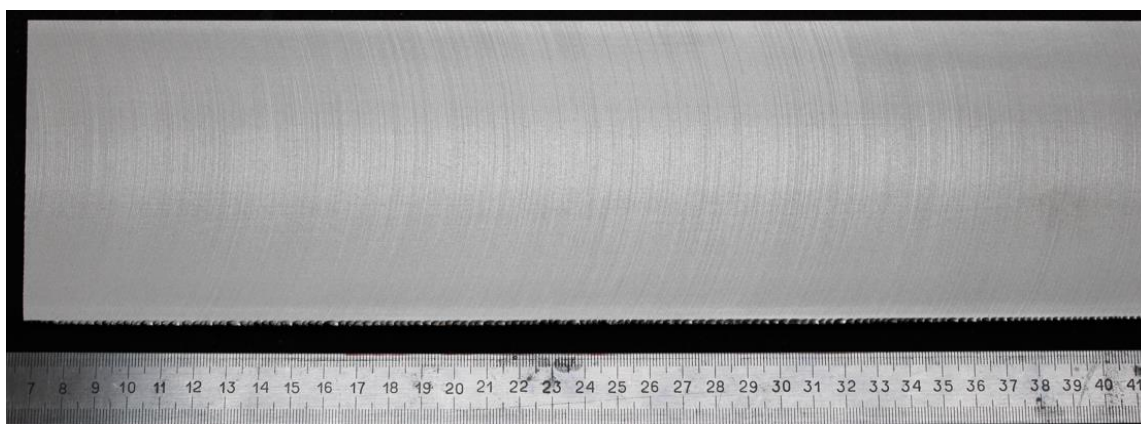
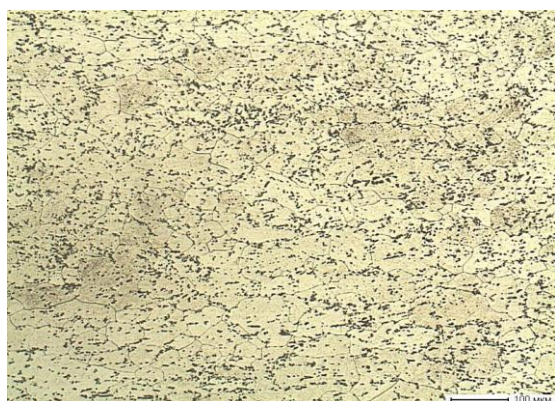
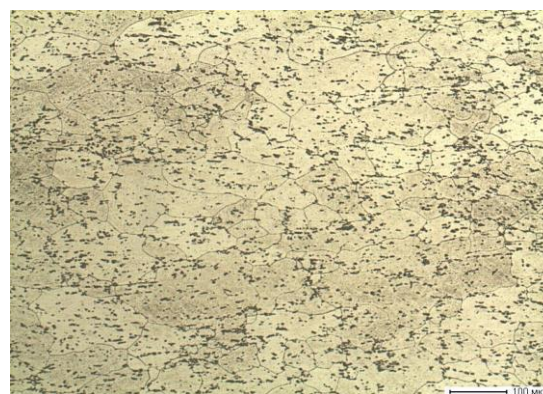


Рис. 2. Макроструктура поперечного сечения исследуемого темплет, отобранного от плиты, произведенной по классическим режимам

Fig. 2. Macrostructure of the cross-section of the templet under study, taken from a plate produced according to classical modes



а



б

Рис. 3. Микроструктура темплет на уровне $\frac{1}{4}$ (а) и $\frac{1}{2}$ (б) его толщины

Fig. 3. Microstructure of the templet at the level of $\frac{1}{4}$ (а) and $\frac{1}{2}$ (б) of its thickness

На уровне $\frac{1}{4}$ толщины плиты размер зерна составил 58 мкм, на уровне $\frac{1}{2}$ – 70 мкм. Таким образом, в выявленной на макроструктуре области светлой полосы темплет имеет более крупное зерно (разница с зерном приповерхностной зоны составляет 20%).

В работе [15] показано, что образование аналогичной светлой полосы на катаных плитах из сплава АК4-1 связано с центральным объемом плоского слитка, для которого характерна зональная ликвация с пониженным содержанием легирующих компонентов. Пониженное содержание легирующих компонентов в центральных объемах проката и более неоднородное распределение включений способствуют увеличению размера рекристаллизованного зерна. Более крупное зерно с большей площадью на шлифе участков твердого раствора, свободных от избыточных фаз, приводит к уменьшению количества растравленных межзеренных и межфазовых границ и к более сильному отражению света, в результате чего участки с подобной структурой выглядят более светлыми.

Принято решение оценить распределение основных легирующих элементов (Cu, Mg) по толщине поперечного сечения традиционного для АО «КУМЗ» плоского слитка размерами 400×1320 мм (исходная заготовка для получения исследуемой плиты) посредством спектрального анализа, для чего от слитка отобраны темплеты с литниковой и донной частей после обрезки. Анализ распределения элементов проводился по толщине темплетов с шагом 15–20 мм по схеме, представленной на рис. 4.

На рис. 5 представлено усредненное распределение меди и магния по толщине темплетов, отобран-

ных от литниковой (рис. 5, а, б соответственно) и донной (рис. 5, в, г соответственно) частей слитка.

На рис. 5 выявлена ярко выраженная зональная ликвация обратного типа, заключающаяся в снижении доли содержания основных легирующих элементов в центральных слоях исследуемых темплетов, что и является причиной образования светлой полосы и укрупнения зерна центральной части плит, изготавливаемых из данных слитков. При этом важно отметить, что процентное содержание основных легирующих элементов соответствует ОСТ 1-90048-90 [16], кроме того, данный слиток не имел типовых дефектов [19].

Для достижения поставленной в работе цели в условиях АО «КУМЗ» осуществлена корректировка режимов горячей прокатки плит.

Работы проведены на четырехвалковом реверсивном стане горячей прокатки «Кварто 2840 United» АО «КУМЗ». Диаметр рабочих валков, используемых на стане, 920-950 мм, максимальное развиваемое давление металла на валки – 3200 т.

Расчет схем обжатий выполнен таким образом, чтобы снизить количество проходов при $m \leq 0,55$, где m – коэффициент формы очага деформации, $m = l_d/h_{cp}$ (l_d – длина дуги захвата, h_{cp} – средняя толщина заготовки), так как прокат в этом диапазоне снижает механические свойства центральных слоев деформируемого раската, разрыхляя структуру за счет растягивающих напряжений, в то время как при значениях $m > 0,55$ уплотнение центральных слоев идет по схеме напряженного состояния, характеризуемой не только сжатием, но и растяжением в продольном направлении. Следует отметить, что значения коэффициента m приняты на основании работы [20].

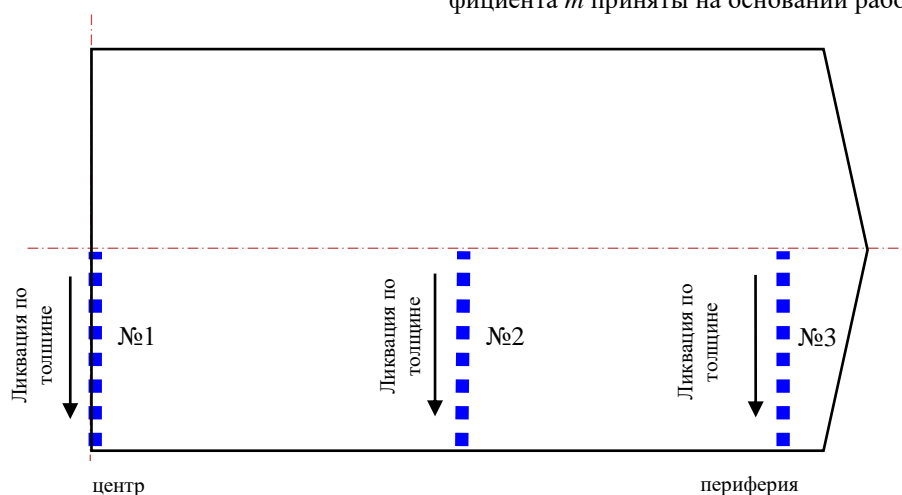


Рис. 4. Схема отбора проб для определения ликвации химических элементов методом спектрального анализа на плоскости темплета

Fig. 4. Sampling scheme for the determination of the chemical elements liquation by spectral analysis on the templet plane

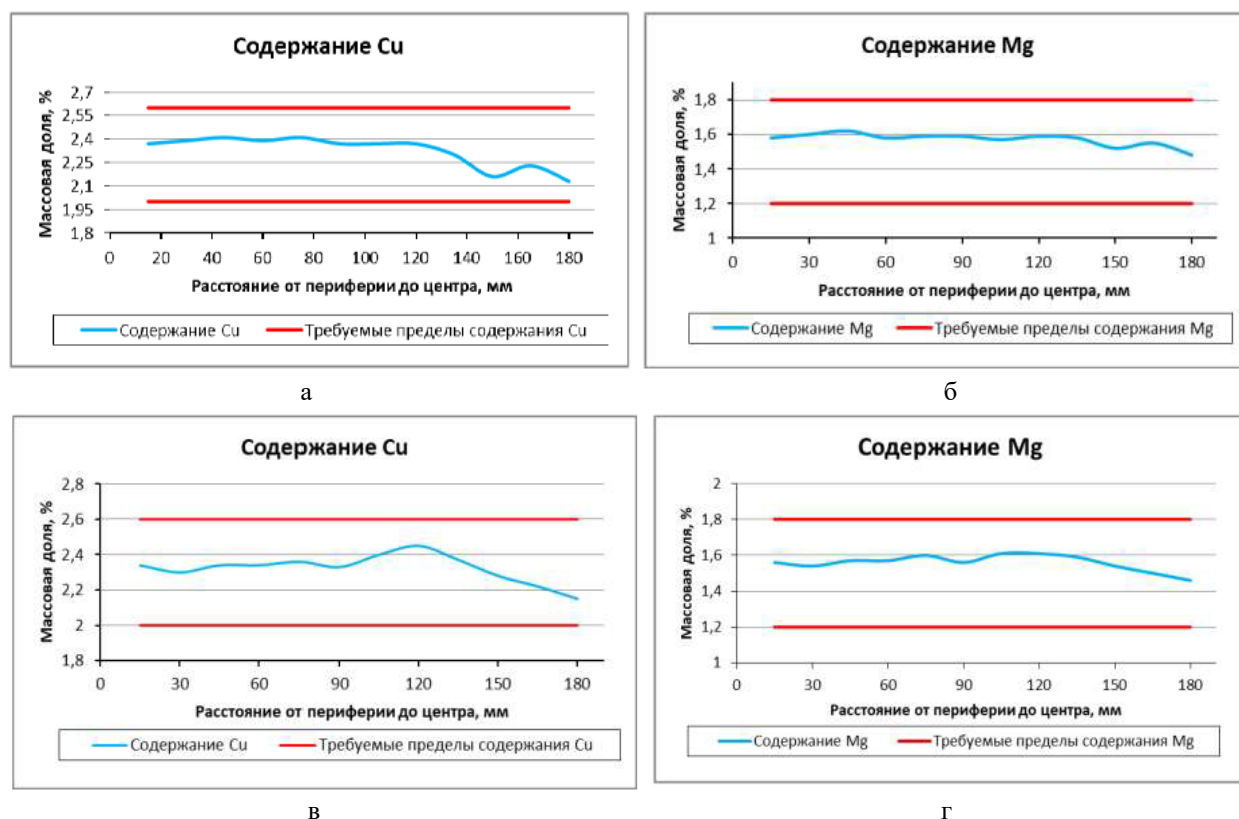


Рис. 5. Усредненное распределение меди и магния по толщине темплетов, отобранных от литниковой (а, б соответственно) и донной (в, г соответственно) частей слитка

Fig. 5. The average distribution of copper and magnesium over the thickness of the templates selected from the gate (а, б, respectively) and bottom (в, г, respectively) parts of the ingot

Введем коэффициент K – безразмерный коэффициент, позволяющий оценить степень проработки металла, рассчитываемый по формуле

$$K = \frac{\sum \Delta h_{(\text{при } m \geq 0,55)}}{\sum \Delta h_{(\text{при } m \leq 0,55)}}, \quad (1)$$

где $\sum \Delta h$ – суммарное абсолютное обжатие, мм.

Таблица 3. Расчет серийной схемы обжатий плиты сплава АК4-1ч сечения 70×1200 мм

Table 3. Calculation of the serial compression scheme for the AK4-1ch alloy plate with a cross section of 70×1200 mm

Абсолютное обжатие, мм	Средняя толщина полосы, мм	Длина дуги захвата, мм	Коэффициент формы очага деформации
10	375	68,92	0,184
0	370	0	0,000
15	362,5	84,40	0,233
20	345	97,46	0,283
30	320	119,37	0,373
35	287,5	128,93	0,448
35	252,5	128,93	0,511
35	217,5	128,93	0,593
35	182,5	128,93	0,707
30	150	119,37	0,796
25	122,5	108,97	0,890
20	100	97,46	0,975
18	81	92,46	1,142

Для обеспечения более полной проработки структуры по высоте плиты в качестве эксперимента произведена горячая прокатка при $K > 1,5$.

Расчет оптимизированной схемы обжатий приведен в табл. 4.

Таблица 4. Расчет оптимизированной схемы обжатий плиты сплава АК4-1ч сечения 70×1200 мм
Table 4. Calculation of the optimized compression scheme for an AK4-1ch alloy plate with a cross section of 70×1200 mm

Абсолютное обжатие, мм	Средняя толщина полосы, мм	Длина дуги захвата, мм	Коэффициент формы очага деформации
10	375	68,92	0,18
0	370	0,00	0,00
40	350	137,84	0,39
45	307,5	146,20	0,48
48	261	151,00	0,58
48	213	151,00	0,71
45	166,5	146,20	0,88
40	124	137,84	1,11
32	88	123,29	1,40

В данном случае $K = (48 + 48 + 45 + 40 + 32)/(10 + 0 + 40 + 45) = 2,24$, то есть увеличен в 2 раза относительно серийной схемы обжатий.

Оптимизированная схема обжатий позволяет вести прокат, не превышая энергосиловые параметры стана. Последующая обработка плит проводится по серийной технологии.

Для анализа временного сопротивления, условного предела текучести и относительного удлинения в направлении L, LT и ST после оптимизации схемы

Таблица 5. Средние значения σ_b , $\sigma_{0,2}$ и δ в зависимости от толщины плиты и направления вырезки образца
Table 5. The average values of σ_b , $\sigma_{0,2}$ and δ , depending on the thickness of the plate and testing direction

Толщина, мм	Направление вырезки образцов	σ_b , МПа	Требование ОСТ1 90117, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Требование ОСТ1 90117, МПа	δ , %	Требование ОСТ1 90117, %
Свыше 40 мм	L	433	410	396	315	9,7	6
	LT	437	390	390	325	8,6	6
	ST	416	375	388	295	6,3	4

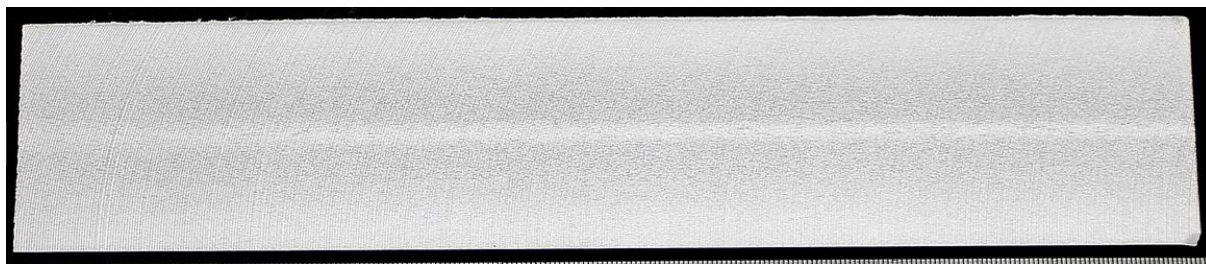


Рис. 6. Макроструктура поперечного сечения исследуемого образца, отобранного от плиты, произведенной по оптимизированным режимам

Fig. 6. The macrostructure of the cross-section of the sample under study, taken from a plate produced according to optimized modes

горячей прокатки произведена выборка из 160 плит толщиной 40-80 мм. Средние значения вышеуказанных механических свойств в зависимости от толщины и направления вырезки образцов после оптимизации схемы горячей прокатки представлены в табл. 5.

Среднее значение относительного удлинения исследуемой выборки плит в направлении ST составило 6,3% при требовании ОСТ1 90117-83 4%. Сравнение величин среднего значения относительного удлинения в высотном направлении до и после оптимизации позволило выявить его повышение в последнем случае на 31%.

Сравнение средних значений механических свойств до и после оптимизации позволяет отметить повышение их общего уровня, что положительно скажется на эксплуатационные свойства изделий.

Также проведено исследование макроструктуры образца, отобранного от плиты, произведенной по оптимизированным режимам обработки (рис. 6). Установлено, что ширина светлой полосы уменьшилась на 70% по сравнению с шириной полосы образца, отобранного от плиты, произведенной по классическому режиму.

Исследование микроструктуры образцов на уровне $\frac{1}{4}$ (рис. 7, а) и $\frac{1}{2}$ (рис. 7, б) толщины плиты показало, что размер зерна в первом случае равен 37 мкм (на 36% меньше, чем до оптимизации), во втором – 39 мкм (на 44% меньше, чем до оптимизации), то есть неоднородность сведена к минимуму.

Можно отметить, что более мелкое зерно в данном случае привело к повышению общего уровня механических свойств.

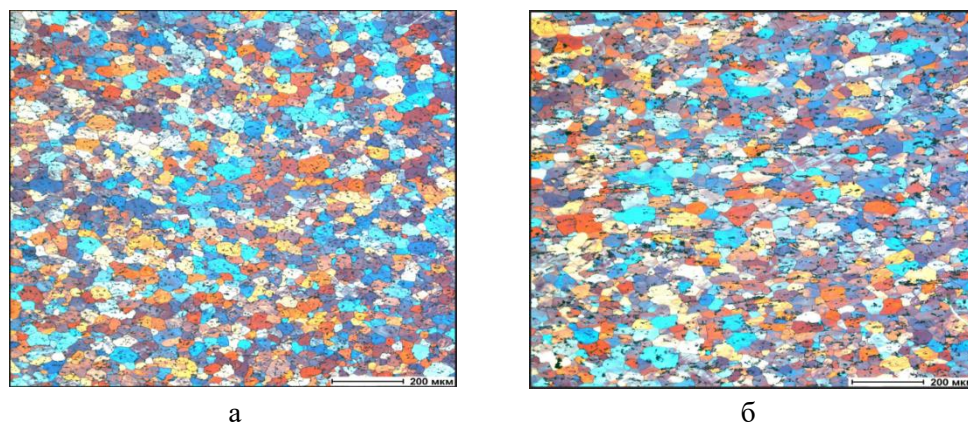


Рис. 7. Микроструктура образца на уровне $\frac{1}{4}$ (а) и $\frac{1}{2}$ (б) его толщины
 Fig. 7. Microstructure of the sample at the level of $\frac{1}{4}$ (a) and $\frac{1}{2}$ (b) of its thickness

Закключение

В результате исследования временного сопротивления, условного предела текучести и относительного удлинения плит толщиной до 40 мм включительно и свыше 40 мм в долевом, поперечном и высотном направлениях (последнее только для плит толщиной свыше 40 мм) выявлено, что средние значения вышеуказанных механических свойств для плит толщиной менее 40 мм включительно в направлениях L и LT превышают требования стандарта для прочностных свойств на 5,5–24%, для пластических свойств – 61–83%. Для плит толщиной свыше 40 мм независимо от направления вырезки образцов средние значения прочностных свойств также имеют технологический запас 2,5–28%. Средние значения относительного удлинения в направлении L и LT для данных плит имеют запас относительно требований стандарта 48–66%. Однако в направлении ST среднее значение относительного удлинения превышает требования стандарта только на 20%.

Посредством исследования макроструктуры образца с пониженным значением относительного удлинения в центре его поперечного сечения обнаружена светлая область, перпендикулярная направлению прокатки. Посредством исследования микроструктуры образца установлено, что светлая область имеет размер зерна на 20% больше, чем периферия. С целью повысить значения относительного удлинения и уменьшить неоднородность структуры в высотном направлении плит толщиной свыше 40 мм осуществлена оптимизация режимов горячей прокатки данных плит. Оптимизированные режимы, а именно горячая прокатка по схемам обжатий, рассчитанным при $K > 1,5$, привели к повышению общего уровня механических свойств плит, в частности, среднее значение относительного удлинения повышено на 31%, а также к уменьшению неоднородности структуры.

По итогам внедрения в схему производства исследуемых плит разработанных оптимизаций проведен анализ значения выхода годного. Установлено,

что оптимизированная схема горячей прокатки позволила увеличить выход годного на 4% по сравнению с выходом годного, получаемого по классическим режимам обработки.

Список источников

1. Яковлев С.И., Завалий Е.А., Замаева Ю.В. Оптимизация технологии производства плит из алюминиевого сплава 7475 // Технология легких сплавов. 2023. № 4. С. 79-87.
2. Логинов Ю.Н., Головин М.А., Снегирев И.В. Статистический анализ механических свойств плоского проката из алюминиевого сплава системы AlCu-Mg-Fe-Ni // Технология легких сплавов. 2017. №1. С. 29-34.
3. Особенности структуры и свойств ковано-катаных плит из конструкционного алюминиевого сплава системы Al-Mg-Cu / Е.Ф. Волкова, И.В. Мостяев, А.А. Алиханян и др. // Технология легких сплавов. 2022. № 4. С. 26-35.
4. Оптимизация режимов искусственного старения кованных и катаных полуфабрикатов из жаропрочного алюминиевого сплава АК4-1ч / А.А. Селиванов, К.В. Антипов, А.И. Асташкин и др. // Труды ВИАМ. 2018. № 4. С. 9-19.
5. Özbek I. A study on the re-solution heat treatment of AA 2618 aluminum alloy // Materials Characterization. 2007, vol. 58(3), pp. 312-317.
6. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186-194.
7. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 195-211.
8. Микроструктура слитка сплава АК4-1ч и ее наследственное влияние на структуру катаной плиты / В.В. Телешов, Л.Г. Березин, Л.С. Осокин и др. // Цветные металлы и сплавы. 1997. № 11-12. С. 93-98.
9. Телешов В.В. Развитие конструкционных деформируемых алюминиевых сплавов систем Al-Cu и Al-Cu-Mg для длительной работы при повышенных температурах // Технология легких сплавов. 2009. № 4. С. 6-31.

10. Williams J., Starke E. Progress in structural materials for aerospace systems // *Acta Materialia*. 2003, vol. 51(19), pp. 5775–5799.
11. Компьютерное моделирование процесса получения штампованной заготовки из сплава АК4-1 для поршня двигателя внутреннего сгорания / И.Л. Константинов, Д.Г. Потапов, С.Б. Сидельников и др. // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2020. № 6. С. 24-31.
12. ОСТ 1 90117-83. Плиты авиационные из алюминиевого сплава марки АК4-1ч. М.: Изд-во стандартов, 1983.
13. Прочность и усталость ультрамелкозернистого алюминиевого сплава АК4-1 / Р.К. Исламгалиев, К.М. Нестеров, Э.Д. Хафизова и др. // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2012. № 8(53). С. 104-109.
14. Mesoscopic analysis of fatigue strength property of a modified 2618 aluminum alloy / L. Zeng, Z. Li, R. Che et al. // *International Journal of Fatigue*. 2014, vol. 59, pp. 215-223.
15. Телешов В.В. Развитие технологии производства плит из жаропрочного деформируемого алюминиевого сплава АК4-1 в связи с их структурой и механическими свойствами. Ч. 2. Особенности структуры плоских слитков и прокатанных из них плит // *Технология легких сплавов*. 2014. № 4. С. 6-22.
16. ОСТ 1 90048-90. Сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М.: Изд-во стандартов, 1990.
17. Телешов В.В. Развитие технологии производства плит из жаропрочного деформируемого алюминиевого сплава АК4-1. Ч. 3. Влияние состава сплава и некоторых параметров технологии на механические свойства при растяжении и электрические характеристики полуфабрикатов // *Технология легких сплавов*. 2015. № 1. С. 8-26.
18. ГОСТ 1497-73. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 2011.
19. Типовые дефекты в слитках и полуфабрикатах из алюминиевых сплавов / Разинкин А.В., Мальцева Т.В., Овсянников Б.В., Левина А.В. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2023.
20. Пат. 16291118 СССР, МПК В21В3/00. Способ горячей прокатки плит из алюминиевых сплавов / В.М. Чертовиков, И.М. Меерович, В.К. Орлов, В.И. Попов, Н.И. Беспутин; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения им. А.И. Целикова. № 4629824/02; заявл. 28.11.1988; опубл. 23.02.1991.
- made of structural Al-Mg-Cu aluminum alloy. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2022;(4): 26-35. (In Russ.)
4. Selivanov A.A., Antipov K.V., Astashkin A.I. et al. Optimization of artificial aging modes for forged and rolled semi-finished products made of heat-resistant aluminum alloy AK4-1ch. *Trudy VIAM* [Proceeding of VIAM]. 2018;(4):9-19. (In Russ.)
5. Özbek I. A study on the re-solution heat treatment of AA 2618 aluminum alloy. *Materials Characterization*. 2007;58(3):312-317.
6. Antipov V.V. Prospects for the development of aluminum, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering products. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies]. 2017;(S):186-194. (In Russ.)
7. Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu., Romanenko V.A. Modern aluminum and aluminum-lithium alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies]. 2017;(S):195-211. (In Russ.)
8. Teleshov V.V., Berezin L.G., Osokin L.S. et al. Microstructure of AK4-1ch alloy ingot and its hereditary influence on the structure of rolled plate. *Tsvetnye metally i splavy* [Non-Ferrous Metals and Alloys]. 1997;(11-12):93-98. (In Russ.)
9. Teleshov V.V. Development of structural wrought aluminum alloys of Al-Cu and Al-Cu-Mg systems for long-term operation at elevated temperatures. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2009;(4):6-31. (In Russ.)
10. Williams J., Starke E. Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*. 2003;51(19):5775-5799.
11. Konstantinov I.L., Potapov D.G., Sidelnikov S.B. et al. Computer simulation of the manufacturing process of a stamped blank from AK4-1 alloy for an internal combustion engine piston. *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy]. 2020;(6):24-31. (In Russ.)
12. State standard OST 1 90117-83. Aviation plates made of aluminum alloy grade AK4-1h. Moscow: Standards Publishing House, 1983. (In Russ.)
13. Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Khafizova E.D. et al. Strength and fatigue of ultrafine-grained AK4-1aluminum alloy. *Vestnik Ufinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ufa State Aviation Technical University]. 2012;(8(53)):104-109. (In Russ.)
14. L. Zeng, Z. Li, R. Che et al. Mesoscopic analysis of fatigue strength property of a modified 2618 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*. 2014;59:215-223.
15. Teleshov V.V. Development of production technology for plates from heat-resistant wrought aluminum alloy AK4-1 in relation to their structure and mechanical properties. Part 2. Structural features of flat ingots and rolled plates. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2014;(4):6-22. (In Russ.)
16. State standard OST 1 90048-90. Wrought aluminum alloy grades. Moscow: Standards Publishing House, 1990. (In Russ.)
17. Teleshov V.V. Development of production technology for plates from heat-resistant wrought aluminum alloy AK4-1. Part 3. Effect of alloy composition and processing parameters on tensile mechanical properties and electrical charac-

References

1. Yakovlev S.I., Zavaliiy E.A., Zamaraeva Y.V. Optimization of the production technology of plates made of 7475 aluminum alloy. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2023;(4):79-87. (In Russ.)
2. Loginov Yu.N., Golovnin M.A., Snegirev I.V. Statistical analysis of mechanical properties of flat rolled products made of Al-Cu-Mg-Fe-Ni aluminum alloy. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2017;(1):29-34. (In Russ.)
3. Volkova E.F., Mostyaev I.V., Alikhanian A.A. et al. Features of the structure and properties of forged-rolled plates

- teristics of semi-finished products. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2015;(1):8-26. (In Russ.)
18. State standard GOST 1497-73. Metals. Tensile test methods. Moscow: Standards Publishing House, 2011. (In Russ.)
 19. Razinkin A.V., Maltseva T.V., Ovsyannikov B.V., Levina A.V. *Tipovye defekty v slitkakh i polufabrikatakh iz al-yuminievykh splavov* [Typical defects in ingots and semi-finished products of aluminum alloys]. Yekaterinburg: Uralskiy rabochiy, 2023. (In Russ.)
 20. Chertovikov V.M., Meerovich I.M., Orlov V.K., Popov V.I., Besputin N.I. *Sposob goryachey prokatki plit iz al-yuminievykh splavov* [Method of hot rolling of plates from aluminum alloys]. Patent USSR, no. 16291118, 1991.

Поступила 12.05.2025; принята к публикации 04.07.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 12/05/2025; revised 04/07/2025; published 25/12/2025

Глинских Павел Иванович – инженер-технолог,
АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия;
магистрант,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия.
Email: Pasha-glinskih@mail.ru

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

Яковлев Сергей Иванович – главный прокатчик,
АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия.
Email: YakovlevSI@kumw.ru.

Завалий Евгений Александрович – заместитель начальника цеха термомеханической обработки
листов и плит,
АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия;
магистрант,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия.
Email: ZavaliyEA@kumw.ru.

Pavel I. Glinskikh – Process Engineer,
JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia;
Master's Student,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: Pasha-glinskih@mail.ru

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

Sergey I. Yakovlev – Chief Engineer of the Rolled Products,
JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia.
Email: YakovlevSI@kumw.ru

Evgeniy A. Zavaliy – Deputy Head of the Thermomechanical Treatment of Sheets and Plates Shop,
JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia;
Master's Student,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: ZavaliyEA@kumw.ru