

## 1561 АЛЮМИНИЙ КУЙМАСЫНЫН ӨТӨ МАЙЫШЧАКТЫК КАСИЕТИНЕ АЛГАЧКЫ АНИЗОТРОПИЯСЫНЫН ТИЙГИЗГЕН ТААСИРИ

Пазылов Ш.Т.<sup>1</sup>, Оморов Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>физ.-мат. илим. канд., Кыргыз-Орус (Славян) университети;

<sup>2</sup>доценттин милдетин аткаруучу, Эл аралык инновациялык технологиялар университети.

**Аннотация:** 1561 алюминий куймасынын баштапкы деформациялык анизотропиясынын жогорку температурада жана кеңири ылдамдыктарды камтыган аралыкта деформациялоодогу өзгөрүлүштөрү изилденген.

**Өзөктүү сөздөр:** деформациялык анизотропия, динамикалык өтө жогорку майыштырылуу, түзүлүш абалдары, текстура.

## О ВЛИЯНИИ ИСХОДНОЙ АНИЗОТРОПИИ НА СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1561

Пазылов Ш.Т.<sup>1</sup>, Оморов Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>канд. физ.-мат. наук, Кыргызско-Российский Славянский университет;

<sup>2</sup>и.о. доцент, Международный университет инновационных технологий

**Аннотация:** Изучаются изменения исходной анизотропии деформационных свойств листового алюминиевого сплава 1561 в зависимости от режимов высокотемпературной деформации в широких скоростных интервалах.

**Ключевые слова:** деформационная анизотропия, динамическая сверхпластичность, структурное состояние, текстура.

## INFLUENCE OF INITIAL ANISOTROPY ON SUPERPLASTICITY OF ALUMINIUM ALLOY 1561

Pazylov Sh.T.<sup>1</sup>, Omorov N.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>candidate of Physical and Mathematical Sciences, Kyrgyz-Russian Slavic University;

<sup>2</sup>acting associate professor, International University of Innovation technologies

**Annotation:** The anisotropy factor assessment under various parameters of thermomechanical loading is estimated by the example of experimental studying deformation and structural parameters of anisotropic Al alloy 1561. It is found that the smallest value of the anisotropy factor corresponds to the formation of equiaxed fine-grained structure formed in the temperature-rate conditions of superplasticity.

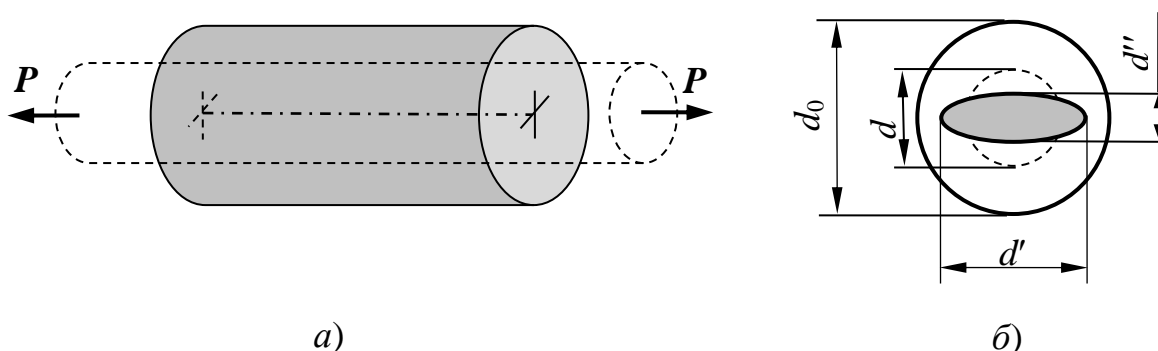
**Keywords:** anisotropy factor; dynamic superplasticity; aluminum alloys; phase transformations.

Анизотропия механических свойств металлов является следствием преимущественного ориентирования кристаллов в результате пластического деформирования в процессах обработки давлением. Она, как правило, первоначально отсутствует у поликристаллов за исключением случаев, полученных способами направленной кристаллизации. Остаточное изменение свойств, возникших в результате пластической деформации и последующие отличия этих свойств в разных направлениях в объеме металла, обычно называют деформационной (вторичной) анизотропией [1]. При статическом нагружении следует различать анизотропию упругих и пластических свойств, а также анизотропию разрушению. Анизотропия металлов наиболее ярко обнаруживается проявляется в процессе пластического деформирования на растяжение.

Сведения по изучению анизотропии механических свойств металлов и влияние на нее различных факторов (технологических и структурных) обобщены в [2]. Очевидно, что анизотропия структурных и механических свойств, учет и целенаправленное использование таких свойств, начиная со стадии проектирования, конструкции и технологии их изготовления способствует повышению надежности, долговечности деталей машин и элементов конструкций, а также эффективного применения конструкционных материалов. Вполне оправданным и одним из важных аспектов является стремление различными (термическим, химико-технологическим, термохимическим) способами уменьшить анизотропию свойств материалов, применяемых в конструкциях [2].

В экспериментальном исследовании по установлению закономерностей высокотемпературного деформирования (в интервале температур (533...793)К) с целью определения режимов сверхпластичности промышленного алюминиевого сплава 1561 обнаружено наличие деформационной анизотропии. Замечено, что круглые образцы, изготовленные из прокатанного по серийной технологии пластины (листа) толщиной 10 мм, после испытаний на растяжение имели эллипсообразные сечения, рис. 1, *а* и *б*. Заметно отличающиеся между собой размеры большой и малой осей эллипсообразного сечения  $d'$  и  $d''$  (рис. 1, *б*.), совпадающих соответственно с плоскостью и толщиной пластины, свидетельствовали о наличии анизотропии деформационных свойств материала в этих направлениях. Следовательно, обнаружено проявление анизотропии пластической деформации во взаимно перпендикулярных направлениях поперечных сечений образцов при высокотемпературном растяжении. При наличии изотропности поперечные деформации образца в указанных направлениях были бы одинаковыми. Форма деформированного сечения рабочего участка образца имела бы вид кругового цилиндра диаметром  $d$  (пунктирные линии рис. 1, *а* и *б*). Причиной полученной анизотропии пластической деформации является

сильная ориентированная текстура материала исходного листа, сформировавшаяся в процессе многоступенчатой прокатки при изготовлении его по технологии серийного производства.



**Рис. 1.** Схема деформирования рабочей части растягиваемого образца – а), и изменение его поперечного сечения в процессе деформации – б).

В опытах установлена сильная зависимость степени анизотропности от термомеханических условий деформирования, которые включают и режимы сверхпластичности. При этом получена тенденция снижения деформационной анизотропности при высоких температурах, в том числе в режимах сверхпластичности. Это обстоятельство, безусловно, позволяет предположить, что между этими явлениями существует естественная взаимосвязь [3]. Кроме того, известны исследования, в которых снижение анизотропности механических свойств алюминиевых сплавов рассматривается как следствие сверхпластической деформации. Так, в [4] приведены данные об анизотропности условного предела текучести алюминиевого сплава АК6 в продольном и поперечном направлениях после деформирования его в условиях сверхпластичности по сравнению с серийной обработкой. Отмечается, что обработка, включающая сверхпластичность, вызывает уменьшение анизотропии механических свойств. Это объясняется устранением или размыванием металлографической и кристаллографической текстуры материала, которые имеют место при сверхпластической деформации [4]. Поэтому исследование влияния термомеханических условий деформирования, в том числе и режимов сверхпластичности сплава, на изменение анизотропности пластической деформации можно считать перспективной задачей, имеющей фундаментальное и прикладное значение.

В настоящей работе приводятся результаты исследования анизотропии пластической деформации сплава 1561 в зависимости от термомеханических параметров процесса деформирования: температуры, скорости и степени деформации. Получены общие закономерности её изменения в исследованных термомеханических интервалах, включающих режимы сверхпластичности сплава. При этом

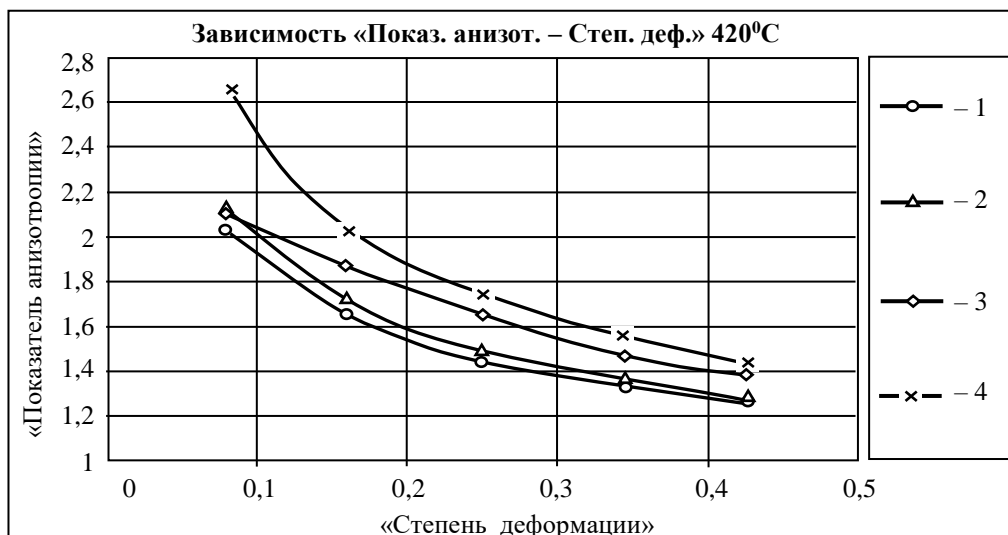
анизотропность оценивается путем замера после температурно-скоростного растяжения поперечной деформации во взаимно перпендикулярных направлениях поперечного сечения рабочей части образца.

В качестве показателя величины анизотропности принято отношение поперечных пластических деформаций  $\psi = \varepsilon''/\varepsilon'$  в направлениях большой  $\varepsilon'$  и малой  $\varepsilon''$  осей эллипсообразно деформированного сечения, которое определяется отношениями  $\varepsilon' = (d_0 - d')/d_0$  и  $\varepsilon'' = (d_0 - d'')/d_0$ , где  $d_0$  – исходный диаметр рабочей части образца;  $d'$  и  $d''$  – соответственно, размеры большой и малой осей деформированного поперечного сечения (рис.1). Закономерности влияния степени пластической деформации на величину показателя анизотропности ( $\varepsilon''/\varepsilon'$ ) установлены при пяти уровнях наименьших поперечных деформаций  $\varepsilon' = 0,0833; 0,166667; 0,25; 0,33333; 0,41667$ .

На рис. 2 приведены графики зависимостей изменения показателя анизотропности  $\psi = \varepsilon''/\varepsilon'$  от степени поперечной деформации  $\varepsilon'$  (т.е. зависимости  $\psi - \varepsilon'$ ) при различных скоростях деформирования при температуре 693 К.

На рис. 3 – значения указанного параметра в зависимости от скоростей деформирования представлены в виде изотерм ( $\psi - \ln \vartheta$ ) для степеней деформации  $\varepsilon'$ , равных 0,08333 (а) и 0,41667 (б).

Отметим, что аналогичные зависимости при других режимах по характеру совпадают.

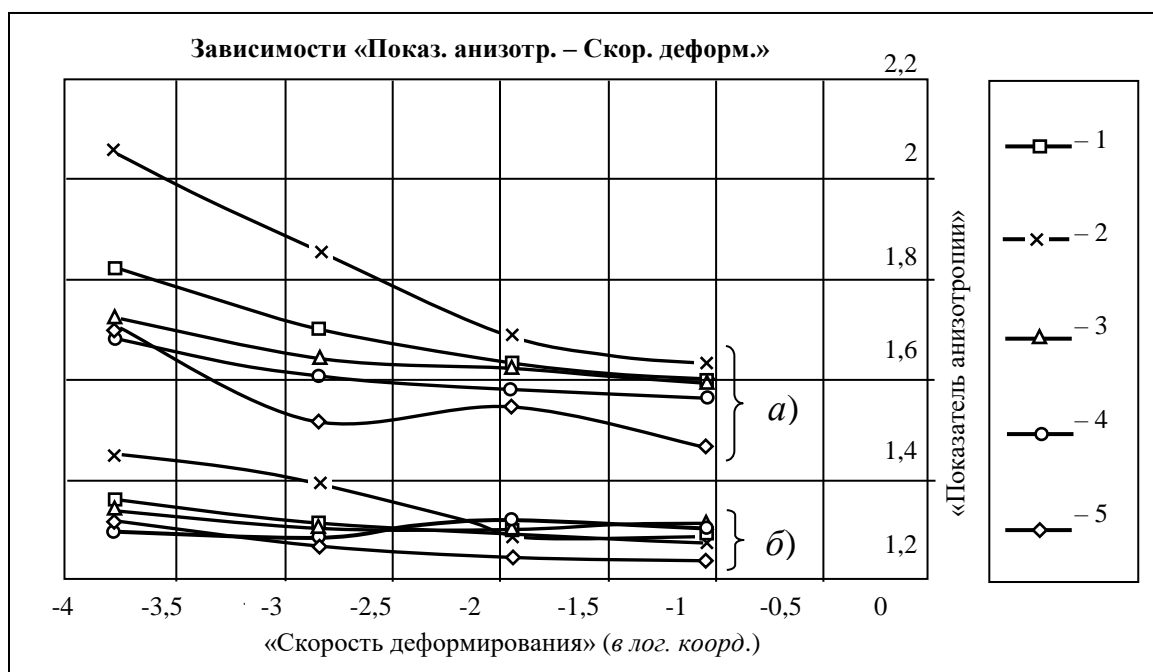


**Рис. 2.** Изменение показателя анизотропности ( $\psi$ ) от степени поперечной деформации ( $\varepsilon'$ ) при температуре 693 К и скоростях деформирования: 1 – при  $\vartheta_3 = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 2 – при  $\vartheta_4 = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 3 – при  $\vartheta_5 = 0,056 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 4 – при  $\vartheta_6 = 0,023 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ .

Из приведенных графиков видна общая закономерность изменения показателя анизотропности. Она заключается в том, что с увеличением степени пластической деформации  $\psi$  убывает при всех скоростях деформирования (рис. 2). Кривые ( $\psi - \varepsilon'$ ) сближаются с ростом степени деформации, отличаясь незначительно между собой (3...9 %) сравнительно с начальной стадией деформации, где отличия являются более

значительными (до 33 %). Максимальные показатели анизотропности соответствуют низким скоростям деформирования (ряд 4 на рис. 2).

Можно отметить снижение показателя анизотропии с увеличением скорости деформирования (рис. 3). Происходит сближение изотерм  $\psi$  при высоких скоростях деформирования в отличие от значительных расхождений в

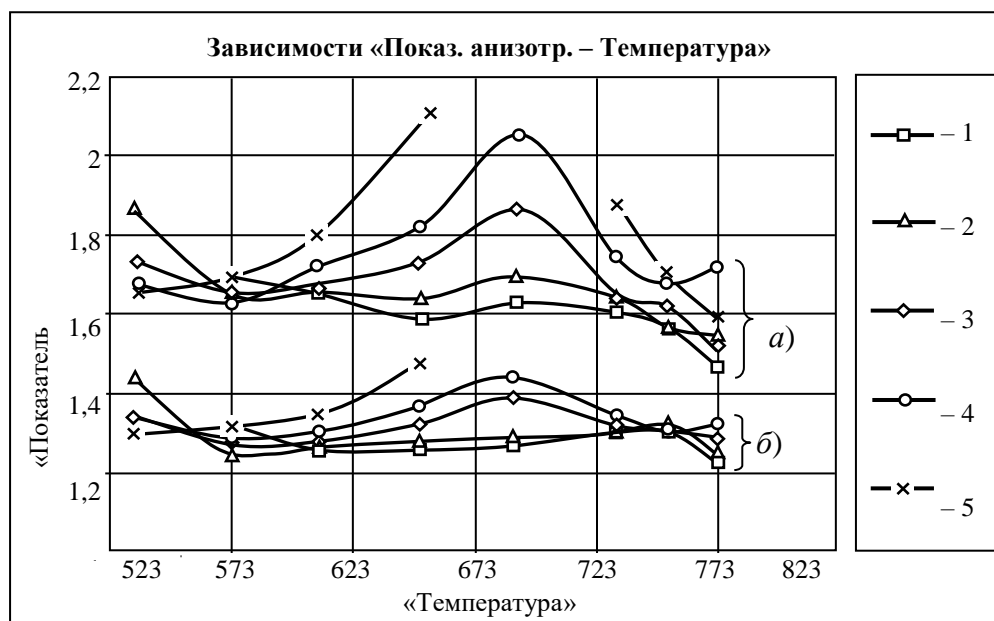


**Рис. 3.** Зависимости показателя анизотропности от скоростей деформирования ( $\psi - \ln \dot{\epsilon}$ ) при степенях деформации  $\epsilon' = 0,08333 - a$ ) и  $\epsilon' = 0,416667 - б$ ). Кривые 1...5 соответствуют температурным режимам: 1 – 653 К; 2 – 693 К; 3 – 733 К; 4 – 753 К; 5 – 773 К.

области низких скоростей. Наибольшие численные показатели анизотропности наблюдаются при температуре 693 К (ряд 2 на рис. 3, а.), выше и ниже которого указанная величина резко падает. В интервале температур (733...773)К разница показателей составляет всего (2...5) % (рис. 3 а). Из установленных закономерностей изменения показателя деформационной анизотропии следует выделить высокотемпературные интервалы (733...773)К и развитые деформации ( $\epsilon' = 0,41667$ ) (кривые 3 и 5 на рис. 3), при которых происходит реализация сверхпластичности сплава 1561. Из результатов, представленных на рис. 3 б, видно, что кривые 3...5 при всех скоростях деформирования располагаются так, что показатели анизотропии отличаются менее, чем на (3...5)%. Следует обратить внимание на своеобразное поведение показателя  $\psi$  при температуре 753 К, при которой анализируемая зависимость (кривая 4), в отличие от других, имеет близкий к горизонтальному характер во всем интервале скоростей деформирования

Рассмотрим изменения показателя анизотропности в зависимости от температуры ( $\psi - T$ ) при постоянных скоростях деформирования (рис. 4).

Здесь уместно выделить температурный интервал 593...753 К, внутри которого с ростом температуры показатель  $\psi$  сначала возрастает при всех



**Рис. 4.** Изменение показателя анизотропии от температуры ( $\psi - T$ ) при скоростях деформирования: 1–  $\dot{\gamma}_3 = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 2–  $\dot{\gamma}_4 = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 3–  $\dot{\gamma}_5 = 0,056 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 4 –  $\dot{\gamma}_6 = 0,023 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 5 –  $\dot{\gamma}_7 = 0,008 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ .

скоростях деформирования и, как было отмечено выше, достигает максимального значения при 693 К, а затем снижается.

Анизотропность существенно зависит от скорости деформирования, причем высокие показатели анизотропии соответствуют низким скоростям деформирования ( $\dot{\gamma}_6, \dot{\gamma}_7$ ), а при высоких скоростях ( $\dot{\gamma}_3, \dot{\gamma}_4$ ) они относительно невелики (рис.4). Ниже отмеченного температурного диапазона (ниже 593 К) происходит обратная тенденция изменения анизотропии в зависимости от скорости деформирования – анизотропия пластической деформации увеличивается с ростом последней. На границах интервала, как видно из графиков ( $\psi - T$ ) (рис. 4), величина расхождения показателей анизотропии минимальна и при развитых степенях деформации ( $\epsilon' = 0,6597$ ) практически не зависит от скорости нагружения. Значения показателя анизотропии для всех скоростей находятся на одинаковом уровне, как показано, например, на рис. 3 б (ряд 4), и величина показателя анизотропии  $\psi \approx 1,25$ . Такое поведение показателя  $\psi$  на верхнем температурном пределе (753 К), как было упомянуто, связано с проявлением сплавом сверхпластических свойств материала.

Как известно, сверхпластическая деформация алюминиевых сплавов реализуется [5] в условиях структурного фазового перехода (динамической рекристаллизации) с образованием равноосных ультрамелких зерен, создавая структурную предпосылку

для реализации механизма зернограничного проскальзывания со сменой соседей зерен. Такой механизм характерен именно для сверхпластичности и превалирует над традиционными формами массопереноса [5]. Тогда очевидно предположить, что отмеченное структурное обстоятельство могло сильно повлиять на макродеформационное поведение сплава и привести к существенному снижению показателя анизотропности в режимах сверхпластичности сравнительно с другими высокотемпературными режимами деформирования. При этом естественно считать, что именно мелкозернистая равноосная структура металла, сформировавшаяся в процессе сверхпластической деформации, стимулировала относительно изотропную деформацию в наблюдаемых направлениях поперечных сечений образцов. Указанное предположение подтверждается минимальным значением показателя анизотропности ( $\psi \approx 1,25$ ) в упомянутом выше температурном режиме 753К (рис. 4) и независимостью этого показателя от скорости деформирования, а именно горизонтальностью кривой ( $\psi - \ln \dot{\epsilon}$ ) (кривая 4 на рис. 3).

Аналогичная ситуация с изменением показателя анизотропии наблюдалась и на нижней температурной границе (593 К). В этом режиме деформирования величина показателя анизотропности, как видно из рис. 3, находится на одинаковом уровне и совпадает с ее значением при верхней температурной границе ( $\psi \approx 1,25$ ). Сохраняется также независимость показателя от скорости деформирования, т.е. постоянство величины  $\psi$  при различных скоростях. Имеется еще одна характерная особенность ниже температуры 593 К (при переходе в низкие температуры деформирования) – закономерность изменения анизотропности в зависимости от скорости деформирования отличается от диапазона 593...753 К. На рис. 4 видно, что имеет место прямо противоположная тенденция характера поведения  $\psi$ , когда анизотропность пластической деформации с ростом скорости деформирования (при  $\dot{\epsilon}_3$  и  $\dot{\epsilon}_4$ ) увеличивается, тогда как при высоких температурах (выше 593 К) показатель анизотропности с возрастанием скорости нагружения уменьшается. Такие качественные различия поведения деформационной анизотропии в зависимости от скорости деформирования позволяют разделить температурный интервал на две области – низких ( $T < 593$  К) и высоких температур (593...753) К с предположительно различными механизмами деформации.

В результате данных исследований установлены новые, не изученные другими специалистами закономерности изменения деформационной анизотропии сплава 1561 в зависимости от условий его деформирования в широком температурно-скоростном диапазоне, включающем режимы проявления сверхпластичности.

В виду отсутствия аналогичных исследований не только по алюминиевым сплавам, но и по другим конструкционным металлическим материалам, а также с целью

объяснения полученных закономерностей, ряд работ [6...11] был посвящен вопросам подтверждения их с точки зрения металлургических представлений и изучения структурных состояний материала сформировавшихся в процессе его деформирования.

Так в работах 6, 7 и 10 показаны взаимосвязи закономерности деформационной анизотропии с эффектом сверхпластичности, а минимальные показатели анизотропии сплава 1561 объяснены как следствия протекающей в этих термомеханических режимах сверхпластической деформации материала.

В (8, 9 и 11) изложено изучение структурных преобразований сплава 1561, которое показывает, что формирование равновесий мелкозернистой структуры соответствует термомеханическим интервалам минимальной анизотропности, и тем самым показывает физическую обоснованность этих закономерностей.

Кроме того, последние исследования изложенные в [12] также показали, что в результате температурно-скоростного растяжения образцов из данного сплава изготовленных в исходно недеформированном, литом состоянии происходит заметные изменения механических и структурных параметров материала. А именно, наблюдается заметное снижение прочностных показателей, а в структурных показателях, укрупнения частиц алюминидов переходных металлов (*Mn*, *Zr*) т.е. снижение их плотности в объёме зерна с образованием в сплаве в начале ячеисто-полигонизованной субструктур, затем и полностью рекристаллизованной структуры. Причем, чем выше температура испытания и ниже скорости деформации, тем крупнее и совершеннее рекристаллизованные зерна металла [12].

Обобщая приведенные данные можно заключить, что в области температур (733...753) К, соответствующей проявлению сверхпластических свойств сплава, наблюдаются минимальные показатели деформационной анизотропии и слабая их зависимость от скоростей деформирования. При развитых пластических деформациях в указанной области анизотропность практически не зависит от скорости и ее показатель при 753 К остается постоянной величиной для всех скоростей. Такое явление объясняется следствием сверхпластической деформации сплава, связанной, главным образом, с механизмом зернограничного проскальзывания и основанном на формировании равноосной мелкозернистой структуры при практическом отсутствии собирательной рекристаллизации [4]. В случае наличия в металле исходной неоднородности микроструктуры происходит ее выравнивание с заметным размытием кристаллографической текстуры [4, 7]. Тем самым создается структурная предпосылка для реализации однородной (изотропной) пластической деформации в исходных структурно-анизотропных направлениях [7, 8, 9]. Поэтому сверхпластическое деформирование, осуществляемое в определенных температурно-скоростных



условиях, можно рассматривать как один из термомеханических способов снижения структурной и деформационной анизотропности исходно текстурированного материала.

На основании полученных результатов принимается, что изучение изменения анизотропности в зависимости от термомеханических условий деформирования в качестве одного из макромеханических методов исследования закономерностей высокотемпературного деформирования листовых материалов, учитывающих изменения их структурного состояния. Величину показателя анизотропности предлагается рассматривать как один из макропараметров материала, позволяющего количественно оценить степень и полноту структурных преобразований относительно исходного состояния в меняющихся термомеханических условиях деформирования.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. **Ашкинази Е.К.** Анизотропия машиностроительных материалов. – Л.: Машиностроение, 1969. – 110 с.
2. **Микляев П.Г., Фридман Я.Б.** Анизотропия механических свойств металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 223 с.
3. **Пазылов Ш.Т.** Влияние термомеханических режимов на деформационную анизотропию сплава 1561 / Материалы IV научной конференции КРСУ. – Бишкек, 1997. – 55 с.
4. **Кайбышев О.А.** Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
5. **Рудаев Я.И., Рудской А.И.** Механика динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов. – СПб: «Наука», 2009. – 217с.
6. **Пазылов Ш.Т., Оморов Н.А., Арзиматов А.К.** Деформационная анизотропия и сверхпластичность алюминиевых сплавов // Вестник КРСУ. – 2010. – т. 10. – С. 144-148.
7. **Пазылов Ш.Т., Оморов Н.А., Рудаев Я.И.** «О деформационной анизотропии алюминиевых сплавов». // Вестник Тамбовского университета. – 2010. – т. 15. – вып. 3. г. Тамбов 2010 год. с. 974-976.
8. **Пазылов Ш.Т.** Структурные изменения алюминиевого сплава 1561 в условиях температурно-скоростного деформирования // Вестник КРСУ. – Т. 15. – № 5. – Бишкек, 2015. – С. 116-119.
9. **Китаева Д.А., Пазылов Ш.Т., Рудаев Я.И.** Температурно-скоростное деформирование алюминиевых сплавов // ПМТФ, – 2016. – т. 57. – №2. – С. 182-189.
10. **Kodzhaspirov G.E., Kitaeva D.A., Pazylov Sh.T., Rudaev Ya.I.** On anisotropy of mechanical properties of aluminum alloys under high temperature deformation – *Materials Physics and Mechanics* 38, 2018. – P. 69-75.
11. **Pazylov Sh.T.** On the Hierarchy of Structural-Phase States of 1561 Aluminum Alloy/ *The 13<sup>th</sup> International Conference on Superplasticity in Advanced Materials (ICSAM 2018), St. Petersburg, Russia, August 19-22, 2018: Defect and Diffusion Forum.* – Trans Tech Publications, Switzerland, 2018. – ISSN: 1662-9515. – P. 325-330.
12. **Пазылов Ш.Т., Оморов Н.А.** Изменение деформационных свойств и структуры алюминиевого сплава 1561 в литом состоянии. «Наука и инновационные технологии». 2020. №4.98-105 стр.