

## ДЕФОРМАЦИОННАЯ АНИЗОТРОПИЯ И СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Ш.Т. Пазылов, Н.А. Оморов, А.К. Арзиматов*

---

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.

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,

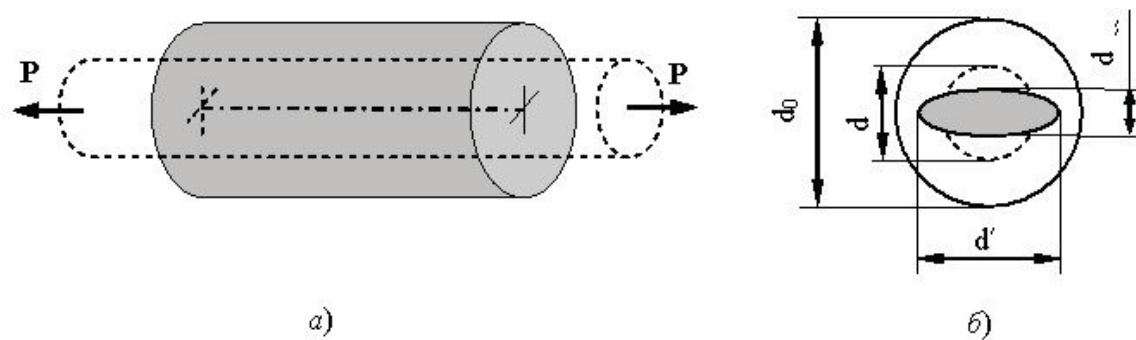


Рис. 1. Схема деформирования рабочей части растягиваемого образца (а) и изменение его поперечного сечения в процессе деформации (б).

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 разрушения. Анизотропия металлов наиболее сильно 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, их учет и целенаправленное использование, начиная со стадии проектирования, способствует повышению надежности, долговечности деталей машин и элементов конструкций, а также эффективно-го применения конструкционных материалов. Поэтому вполне понятно 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, 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 изотропии 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, б). Причиной полученной анизотропии пластической деформации является сильная ориентированная текстура материала исходного листа, сформировавшаяся в процессе многоступенчатой прокатки при изготовлении его по серийной технологии.

В опытах установлена сильная зависимость степени анизотропии от термомеханических условий деформирования, которые включают и режимы сверхпластичности. При этом получена тенденция снижения деформационной анизотропии 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 анизотропии механических свойств алюминиевых сплавов рассматривается как следствие сверхпластической деформации. Так, в [4] приведены данные об анизотропии 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 анизотро-

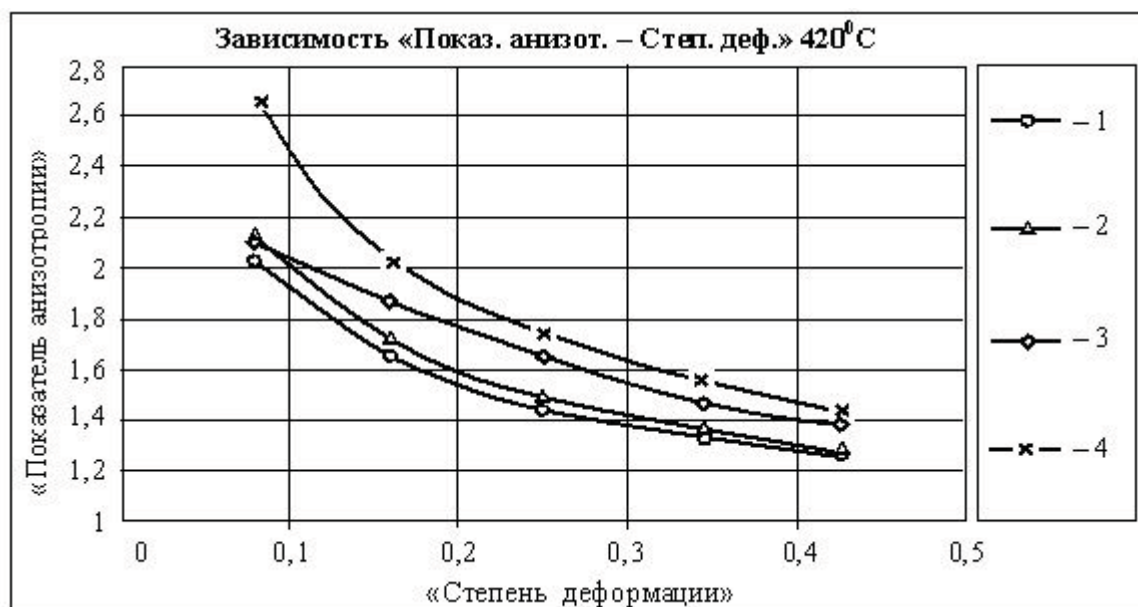


Рис. 2. Изменение показателя анизотропии ( $\psi$ ) от степени поперечной деформации ( $\epsilon'$ ) при температуре 693 К и скоростях деформирования:  
 1 –  $\vartheta_3 = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 2 –  $\vartheta_4 = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 3 –  $\vartheta_5 = 0,056 \cdot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

пии механических свойств. Это объясняется устранением металлографической и размытием кристаллографической текстур, которые имеют место при сверхпластической деформации [4]. Поэтому исследование влияния термомеханических условий деформирования, в том числе и режимов сверхпластичности сплава, на изменение анизотропии 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  $\psi = \epsilon''/\epsilon'$  в направлениях большой  $\epsilon'$  и малой  $\epsilon''$  осей эллипсообразного

сечения, которые определяются отношениями  $\epsilon' = (d_0 - d')/d_0$  и  $\epsilon'' = (d_0 - d'')/d_0$ , 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 анизотропии ( $\epsilon''/\epsilon'$ ) установлены при четырех уровнях наименьших поперечных деформаций  $\epsilon' = 0,3055; 0,4375; 0,5556; 0,6597$ .

На рис. 2 приведены графики зависимостей изменения показателя анизотропности  $\psi = \epsilon''/\epsilon'$  от степени поперечной деформации  $\epsilon'$  (т.е. зависимости  $\psi - \epsilon'$ ) 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  $\epsilon'$ , равных 0,3055 (а) и 0,6497 (б).

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

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 ( $\psi - \epsilon'$ ) сближаются с ростом степени



Рис. 3. Зависимости показателя анизотропии от скоростей деформирования ( $\psi - \ln \dot{\epsilon}$ ) при степенях деформации  $\epsilon' = 0,3056$  – а) и  $\epsilon' = 0,6597$  – б). Кривые 1...5 соответствуют температурным режимам: 1 – 653 К; 2 – 693 К; 3 – 733 К; 4 – 753 К; 5 – 773 К.

деформации, отличаясь незначительно между собой (3...9%) по сравнению с начальной стадией деформации, где отличия являются более значительными (до 33%). Максимальные показатели анизотропии 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 области низких скоростей. Наибольшие численные показатели анизотропии 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 ( $\epsilon' = 0,6597$ ) (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 анизотропии 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 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 ( $v_6$ ), а при высоких скоростях ( $v_3, v_4$ ) 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

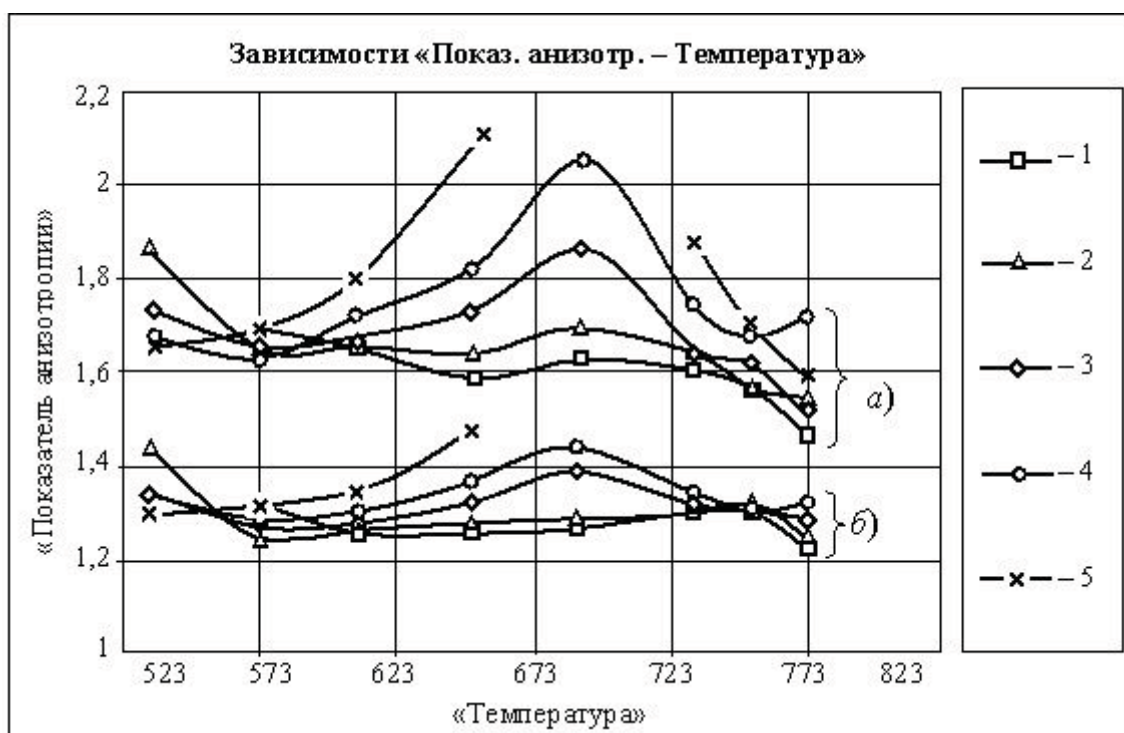


Рис. 4. Изменение показателя анизотропии от температуры ( $\psi - T$ ) при скоростях деформирования: 1 –  $\dot{\gamma}_3 = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 2 –  $\dot{\gamma}_4 = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 3 –  $\dot{\gamma}_5 = 0,056 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{-1}$ ; 4 –  $\dot{\gamma}_6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

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  $\psi = 1,2$ . Такое поведение показателя  $\psi$  на верхнем температурном пределе (753 К), как было упомянуто, связано с проявлением сплавом сверхпластических свойств.

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]. Можно предположить, что отмеченное структурное обстоятельство способно сильно повлиять на микродеформационное поведение сплава и привести к существенному снижению показателя

анизотропии в режимах сверхпластичности по сравнению с другими высокотемпературными режимами деформирования. По нашему мнению, 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 анизотропии ( $\psi = 1,2$ ) в упомянутом выше температурном режиме 753К (рис. 4) и независимостью этого показателя от скорости деформирования, а именно горизонтальностью кривой ( $\psi - \ln \dot{\gamma}$ ) (кривая 4 на рис. 4).

Аналогичная ситуация с изменением показателя анизотропии наблюдалась и на нижней температурной границе (593 К). В этом режиме деформирования величина показателя анизотропии совпадает с ее значением при верхней температурной границе ( $\psi = 1,2$ ). Сохраняется также независимость показателя от скорости деформирования, т.е. постоянство величины  $\psi$  при различных скоростях. Имеется еще одна характерная особенность ниже температуры 593К

(при переходе в низкие температуры деформирования) – закономерность изменения анизотропии 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 анизотропии 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 (593...753 К) температур с предположительно различными механизмами деформации.

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]. Тем самым создается структурная предпосылка для реализации однородной

(изотропной) пластической деформации в исходных структурно-анизотропных направлениях. Поэтому сверхпластическое деформирование, осуществляемое в определенных температурно-скоростных условиях, можно рассматривать как один из термомеханических способов снижения структурной и деформационной анизотропии исходно текстурированного материала.

На основании полученных результатов можем принять, что изучение изменения анизотропии в зависимости от термомеханических условий деформирования является одним из макромеханических методов исследования закономерностей высокотемпературного деформирования листовых материалов, учитывающих изменения их структурного состояния.

Величину показателя анизотропии предлагается рассматривать как один из макропараметров материала, позволяющего количественно оценить степень и полноту структурных преобразований относительно исходного состояния в меняющихся термомеханических условиях деформирования.

#### Литература

1. Ашкнази 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 // Мат-лы IV научн. конф. КРСУ. Бишкек, 1997. 55 с.
4. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984. 264 с.
5. Рудаев Я.И. О фазовых переходах в сверхпластичности // Проблемы прочности. 1990. №10. С. 50–54.