УДК 669.295:539.374

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ И УПРОЧНЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ СПЛАВОВ С РАЗЛИЧНОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ

© Владимир Владимирович Столяров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

vlstol@mail.ru

Аннотация *Рассмотрено деформационное поведение сплавов различной природы в условиях интенсивной пластической деформации прокаткой с импульсным током. Традиционное деформационное упрочнение и повышение деформируемости с введением тока наблюдается в чистых металлах, однородных по химическому и фазовому составу твердых однофазных растворах и интерметаллиде. В сплавах с фазовым превращением или гетерогенных системах с наличием ликвационных зон в виде эвтектики введение тока может снижать деформационную способность и приводить к ускоренному разрушению.*

Ключевые слова: *деформируемость, упрочнение, прокатка, микроструктура*

INFLUENCE OF THE PULSE CURRENT ON DEFORMABILITY AND HARDENING AT THE ROLLING OF ALLOYS WITH THE VARIOUS MICROSTRUCTURE

V.V. Stolyarov

Mechanical Engineering Research Institute, Moscow, Russia

Abstract Deformation behavior of various alloys under the rolling with pulse current is considered. Conventional strengthening and enhanced deformability with increasing of the current density is observed for pure metal, homogeneous on chemical and phase composition the single phase solid solution and intermetallic. In the alloys with phase transformation or heterogeneous systems with liquation eutectic zones the introduction of current can decrease the deformability and lead to accelerated fracture.

Key words: *deformability, strengthening, rolling, microstructure*

Введение

Деформируемость и склонность к упрочнению материалов являются важными технологическими характеристиками в различных схемах обработки металлов давлением (ОМД). Они определяют возможности материала и оборудования, а также эффективность самого процесса ОМД. Резкое упрочнение, например, титановых сплавов, или низкая трещиностойкость вынуждают снижать разовые деформации и повышать температуру деформации. Методы ОМД с одновременным введением переменного, постоянного или импульсного тока большой плотности во многих случаях решают задачу повышения деформируемости материала за счет теплового эффекта тока [1, 2]. При этом, однако, структурные аспекты – измельчение, фазовый состав, однородность получаемых полуфабрикатов не рассматриваются.

В последнее время ОМД с током используют не только для получения формы и размеров изделия, но и для направленного воздействия на микроструктуру с целью повышения физико-механических свойств [3,4]. Так, после прокатки с током в сплавах TiNi с памятью формы повышаются обратимая деформация и реактивное напряжение, в сплавах TiNb – критические параметры сверхпроводимости, в алюминиевых сплавах – прочностные

характеристики [5]. Поэтому поиск оптимальных параметров режимов ОМД с током во многих случаях определяется деформационной способностью сплавов.

Цель работы – сравнить деформационное поведение сплавов с различным типом микроструктуры при прокатке с током.

Материал и методика исследований

Объектами исследования были выбраны: технически чистый однофазный титан ВТ1-0 (0.3% примесей) в крупнозернистом КЗ ($d_з$=20мкм) и ультрамелкозернистом УМЗ ($d_з$=0.25мкм) состояниях, полученных, соответственно, горячей прокаткой и равноканальным угловым прессованием [6]; однофазный крупнозернистый ($d_з$=50мкм) интерметаллидный сплав с памятью формы $Ti_{49..3}Ni_{50.7}$ после закалки в воду; двухфазный ($\alpha+\beta$) КЗ титановый сплав ВТ6 (Ti-6%Al-4%V) после отжига при 850 °С; КЗ стареющие алюминиевые сплавы АД33 (Al-0.92%Si-0.69%Mg-3%Cu-0.31%Fe) и Д16 (Al-4.5%Cu-1.4%Mg-0.32%Fe-0.2%Si) после закалки в воду. Образцы для прокатки в форме полос и прутков имели размеры 2х6х150 мм^3 и ∅6х150мм^3. Прокатку проводили на вальцах, оборудованных генератором импульсного тока, по методике [3].

Прокатку вели при комнатной температуре со скоростью 4 м/мин в пошаговом режиме при малом разовом обжатии по толщине 25 мкм, что позволяло достаточно точно определять момент появления микротрещин. Плотность однополярного импульсного тока варьировали в интервале

j=0-400 А/мм^2 при постоянной длительности импульсов 0,8х10^{-4} с. В единичном шаге прокатки время нахождения образца под током с учетом частоты, длительности импульса и скорости прокатки составляло 0.16 с. Суммарное время воздействия тока для каждого образца зависело от количества циклов прокатки и не превышало 2-5 с. После каждого шага прокатки образцы выдерживали на воздухе или охлаждали в воде, чтобы избежать влияние разогрева. Истинную деформацию *e* при прокатке, по которой оценивали деформационную способность сплава, вычисляли по изменению поперечного сечения образца $e = \ln S_0/S_i$, при этом определяли суммарную максимальную деформацию e_Σ, соответствующую появлению первых микротрещин или полному разрушению при многоразовой прокатке.

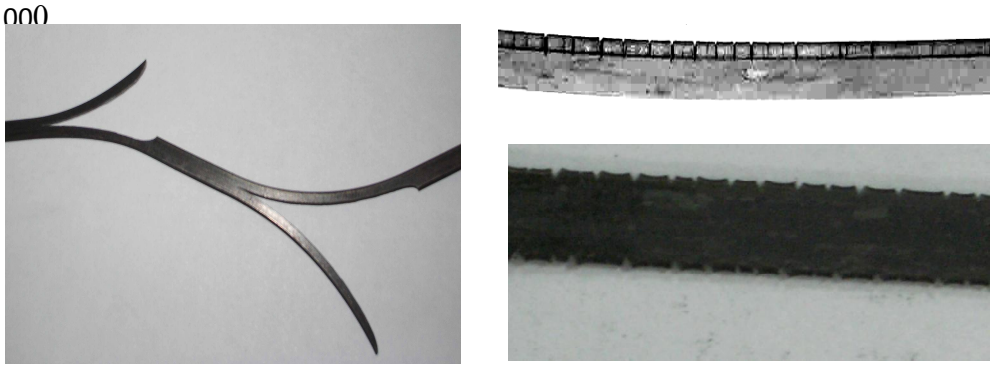
Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3 под нагрузкой 0.01 Н с точностью ±5%.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Деформационная способность исследуемых сплавов оценивалась внешним видом прокатанных образцов и величиной максимально достигнутой деформации до разрушения при увеличении плотности тока.

Например, для однофазного сплава TiNi интерметаллидной природы разрушение образцов при прокатке без пропускания тока происходит хрупко с разделением на части (рис.1а), что никогда не наблюдается при прокатке с пропусканием тока (рис. 1*б*). В последнем случае разрушению предшествует появление краевых микротрещин, вызванных сильным наклепом и изменением напряженно-деформированного состояния от объемного равноосного преимущественно к плоскому двухосному при уменьшении толщины образца. Эксперименты показали, что удаление краевых микротрещин в процессе прокатки позволяет повысить максимальную деформацию до разрушения, причем особенно заметно для прокатки с пропусканием током.

Для всех титановых сплавов деформируемость повышается с введением тока, при этом многократное повышение деформируемости проявляется для высокопрочных сплавов и состояний (табл.1).



а б

Рис.1. Характер разрушения образцов сплава TiNi в процессе плоской прокатки: а - без тока, e=0.86; б - с током, e=1.42.

Таблица 1. Деформируемость сплавов

Сплав (состояние)	e_Σ без тока	e_Σ с током
ВТ1-0 (КЗ) (УМЗ)	2.3 0.5	3.2 (при j=80А/мм^2) 1.2 (при j=80А/мм^2)
$Ti_{49.3}Ni_{50.7}$	0.5	1.2 (при j=160А/мм^2)
ВТ6 ($\alpha + \beta$)	0.55	2.4 (при j=120А/мм^2)
АД33	1.3	0.5 (при j=400А/мм^2)
Д16	2.5	< 2.5 (при j=20-150А/мм^2

Увеличение основных параметров тока также способствует повышению деформируемости. На примере сплава $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ на рис.2 показана зависимость деформируемости от режимов тока при прокатке.

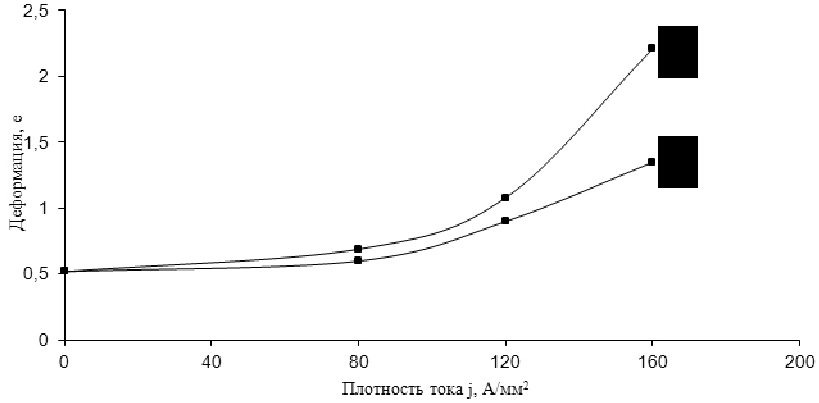
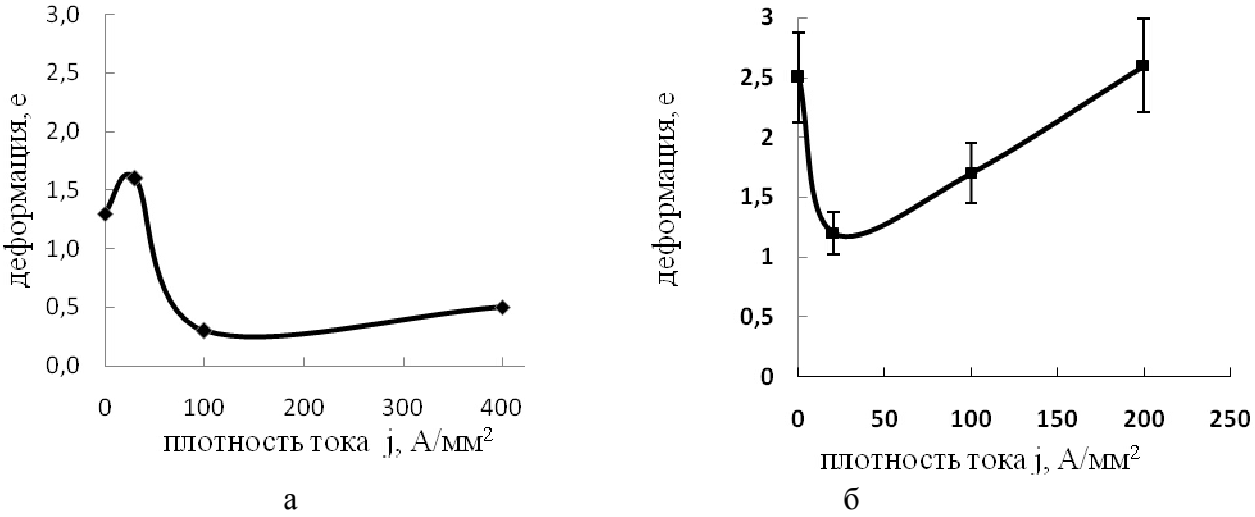


Рис.2. Влияние плотности тока и длительности импульса на деформируемость КЗ сплава $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ при прокатке: 1- τ = 80 мкс; 2 - τ = 160 мкс.

Видно, что повышение плотности тока, особенно выше 80 А/мм^2, и длительности импульса повышает деформируемость в 1.5-2 раза по сравнению с прокаткой без тока (j=0 А/мм^2). Аналогичные зависимости были получены для титановых сплавов ВТ1-0, ВТ6 [7-9].

Рассмотрим деформационное поведение алюминиевых сплавов в закаленном крупнозернистом состоянии, представленное на рис.3.



а б

Рис.3. Влияние плотности тока на деформируемость сплава АД33 (а) и Д16 (б)

Характер зависимости на рис.3 резко контрастирует с аналогичной зависимостью на рис.2. Для обоих сплавов существует интервал значений плотности тока (10-100 и 0-25 А/мм^2), для которого деформируемость резко снижается по сравнению с прокаткой без тока. За пределами этих интервалов деформируемость повышается с увеличением плотности тока, однако только для сплава Д16 она восстанавливается до исходного значения.

Можно отметить также, что деформируемость сплава Д16 заметно выше, а соответствующие значения плотности тока ниже, чем для сплава АД33.

Деформационное упрочнение Измерение микротвердости после прокатки позволяет оценить характер деформационного упрочнения материала (рис.4а) и сравнить его для разных режимов тока (рис.4б) и разных материалов (рис.5).

25165977625165977625167052 8

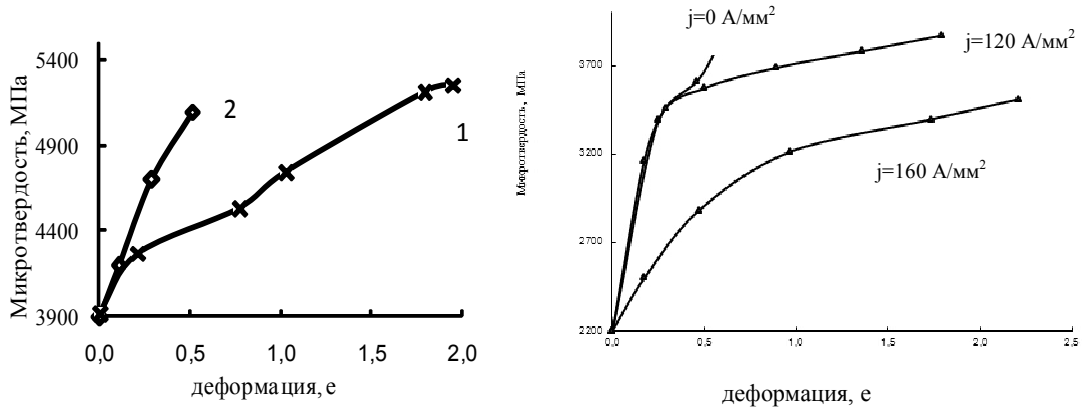


Рис.4. Зависимость микротвердости от деформации при прокатке: а - ВТ6, 1- с током (j=120А/мм^2, τ=160мкс); 2- без тока; б - $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$.

Из рис.4а видно, что степень деформационного упрочнения в сплаве ВТ6 при прокатке с током ниже, а максимальная микротвердость выше, чем для прокатки без тока. Такая зависимость деформационного упрочнения от введения тока типична для всех исследованных крупнозернистых титановых сплавов (ВТ1-0, $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$). Повышение плотности тока приводит к уменьшению деформационное упрочнения, что демонстрируется для сплава $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ на рис.4б.

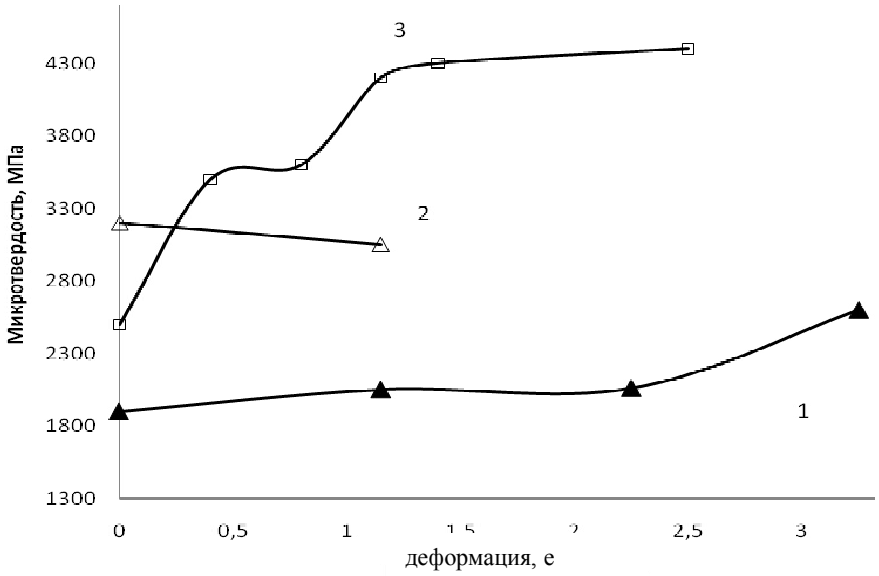


Рис.5. Характер деформационного упрочнения при прокатке с током (j=80 А/мм^2) для титановых сплавов: 1-КЗ ВТ1-0; 2 – УМЗ ВТ1-0; 3 – КЗ $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$

Интенсивность деформационного упрочнения зависит от природы и степени дисперсности сплава. Так, деформационное упрочнение в КЗ чистом титане ниже, чем в интерметаллидном сплаве $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ (рис.5, кривые 1 и 3). В тоже время сильное измельчение микроструктуры титана приводит даже к разупрочнению под действием тока одинаковой плотности (рис.5, кривая 2).

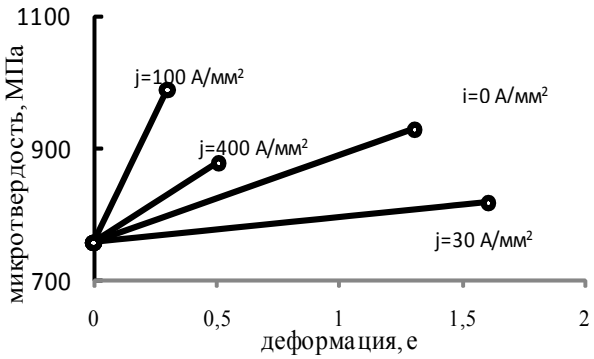


Рис.6. Влияние плотности тока на деформационное упрочнение в сплаве АД33

В алюминиевых сплавах характерная тенденция снижения деформационного упрочнения с повышением плотности тока, в отличие от титановых сплавов, нарушается (рис.6). При всех режимах тока сплав АД33 в процессе прокатки упрочняется, однако, интенсивность упрочнения изменяется неоднозначно.

Наиболее сильно сплав упрочняется при плотности тока 100 А/мм^2, повышение и уменьшение плотности тока относительно этого значения приводит к снижению интенсивности упрочнения.

Обсуждение результатов

При рассмотрении деформационного поведения исследуемых сплавов в процессе прокатки с импульсным током было обнаружено, что деформационная способность и

деформационное упрочнение титановых и алюминиевых сплавов заметно отличаются. В сплавах титана деформируемость повышается с ростом плотности тока или длительности импульса, при этом особенно сильно при j и τ выше критических значений (рис.2). Поскольку данные параметры тока определяют его мощность, то этот результат является закономерным следствием механизмов, связанных с электропластическим или тепловым эффектами [1, 2]. Следует отметить, что исследованные сплавы титана в КЗ состоянии являются стабильными и не испытывают структурно-фазовых превращений при нагреве до температуры полиморфного превращения титана. С другой стороны прямые измерения методом инфракрасной камеры свидетельствуют, что максимальная температура на поверхности прокатываемых образцов с током не превышает 150 °С и не может обеспечивать повышенную пластичность и столь значительную деформируемость [10]. Можно считать, что основной вклад в деформируемость с током вносит электропластический эффект.

Деформационное упрочнение КЗ титановых сплавов и его обратная зависимость от плотности тока также являются типичными для многих материалов и являются подтверждением механизма электропластического эффекта (рис.4). Разупрочнение, наблюдаемое для УМЗ титана (рис.5, кривая 2), детально не исследовано. Возможно, оно связано с динамической рекристаллизацией и ростом зерен, либо с низкотемпературной сверхпластичностью.

В гетерогенных алюминиевых сплавах деформируемость и упрочнение ведут себя аномально с повышением плотности тока. Деформируемость резко уменьшается при относительно низких значениях j (рис.3а,б), а деформационное упрочнение при этом растет (рис.6). Такое необычное деформационное поведение объясняется природой сплавов и структурными превращениями при воздействии тока. Оба типа сплавов относятся к эвтектическим системам Al-Mg-Si и Al-Cu-Mg и в своей микроструктуре могут иметь ликвационные эвтектические зоны с низкой температурой плавления. Под тепловым действием тока эти зоны способны оплавляются, что может приводить к появлению пор, сливающихся в микротрещины. В [11] авторы подтвердили данный механизм разрушения структурными исследованиями сплава АД33. Там же было показано, что в результате частичной динамической рекристаллизации под действием больших плотностей тока в сплаве формируются полосы с наноструктурой, упрочняющие сплав. Аномальное упрочнение при прокатке с током может быть обусловлено и процессами старения, если тепловой эффект тока не превышает температуры сольвуса.

Заключение

Деформационное поведение различных сплавов при одновременном действии импульсного тока имеет отличительные особенности, связанные с природой материала и его структурным состоянием. В структурно стабильных крупнозернистых титановых сплавах повышенная деформируемость и снижение деформационного упрочнения связаны с действием электропластического эффекта. В гетерогенных стареющих алюминиевых сплавах наблюдается аномальная зависимость деформационной способности и упрочнения, которые являются следствием структурно-фазовых превращений, вызванных тепловым эффектом.

Список литературы

1. **Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д.,** Физические основы и технологии обработки современных материалов (в 2-х томах), т. 1. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, (2004) 590с.

2. **Conrad H.** Electroplasticity in metals and ceramics // Mater. Sci&Eng. A287. 2000. P. 276–287.

3. **Столяров В.В., Угурчиев У.Х., Трубицына И.Б., Прокошкин С.Д., Прокофьев Е.А.** Интенсивная электропластическая деформация сплава TiNi // ФТВД. Т.16. №4. 2006. С.48-51.

4. Потапова А.А., Столяров В.В. Влияние режимов отжига на структуру и микротвердость прутка TiNi // МиТОМ. №11. 2011. С.41-45.

5. **Столяров В.В.** Наноструктурирование сплавов методом интенсивной прокатки с током // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. Новокузнецк: Изд-во «СибГИУ». 2013. Т.1. С.126-133.

6. **Столяров В.В.,** Объемное и поверхностное наноструктурирование титановых сплавов // Наноинженерия. 2013. 3(21). С.3-8.

7. **У.Х. Угурчиев, В.В. Столяров,** Деформируемость и микротвердость крупнозернистых титановых сплавов при прокатке с током // Проблемы машиностроения и надежности машин. 5. 2012. С.66-69.

8. **В.В. Столяров, В.Э. Меденцов**, Особенности деформирования, структура и механические свойства сплава ВТ6 при электропластической прокатке // Деформация и разрушение. №12. 2012. С.37-41.

9. **О.В. Семендеева, Н. В. Учеваткина, В.В. Столяров**, Микроструктура и деформируемость сплава ВТ6, подвергнутого электропластической прокатке // Деформация и разрушение материалов. №8. 2011. С.20-23.

10. **Угурчиев У.Х., Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б., Столяров В.В.** Эволюция температуры в сплаве TiNi при прокатке или растяжении в условиях импульсного тока // сб. докладов МИКМУС. ИМАШ РАН. Москва. 2009. С.51.

11. **Бродова И.Г., Столяров В.В., Астафьев В.В., Ширинкина И.Г., Яблонских Т.И., Потапова А.А.,** Эволюция структуры алюминиевого сплава АД33 в процессе прокатки с током // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. Новокузнецк: Изд-во «СибГИУ». 2013. Т.2. С.21-28.