

А.А. Симонова, канд. техн. наук, Кременчуг, Украина,
Н.В. Вerezуб, д-р техн. наук, Л.И. Пупань, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНА С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

Наведено результати експериментальних досліджень впливу умов механічної обробки на мікротвердість зразків з титану, отриманих одним із методів інтенсивного пластичного деформування – всебічним куванням. Встановлено суттєві зміни мікротвердості залежно від параметрів режиму обробки, що свідчать про нестабільність структури субмікрокристалічного титану ВТІ-0, зумовлену тепловим фактором.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния условий механической обработки на микротвердость образцов из титана, полученных одним из методов интенсивной пластической деформации – методом всестороннейковки. Установлены существенные изменения микротвердости в зависимости от параметров режима обработки, которые свидетельствуют о нестабильности структуры субмикроструктурированного титана ВТІ-0, обусловленной тепловым фактором.

A.A. SIMONOVA, N.V. VEREZUB, L.I. PUPAN'

INFLUENCE OF MACHINING ON MICROHARDNESS OF PREPARATIONS FROM THE TITAN WITH THE SUBMICROCRYSTALLINE STRUCTURE, RECEIVED BY INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION

The experimental results of the influence of the machining conditions on the microhardness of titanium goods got by the method of intensive plastic deformation are shown. Substantial changes of the microhardness depending on the parameters of the machining have been established. It testify to instability of structure state of the fine-crystalline BTI-0 which is conditioned by a thermal factor.

Одним из наиболее востребованных, имеющих реальное практическое применение и наиболее финансируемых направлений нанотехнологий является создание принципиально нового класса конструкционных материалов, обладающих существенно более высокими характеристиками механических свойств по сравнению с традиционными аналогами.

Перспективной технологией получения подобных материалов являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД) – методы деформационного диспергирования, обеспечивающие измельчение микроструктуры в металлах и сплавах до наноразмеров за счет больших деформаций сдвига.

Сдвиг является основным механизмом пластической деформации. Схема простого сдвига обеспечивает возможность многократного циклического деформирования путем изменения направления действия касательных напряжений на границах деформируемого объема после очередного цикла обработки. Это позволяет достигать высоких значений интенсивности накопленных де-

формаций, причем на каждом цикле деформирования можно обеспечить заданную величину сдвига.

Формирование наноструктур реализуется за счет использования обжатия с большими степенями деформации (мегапластическая деформация со степенями $\varepsilon = 3 \dots 10$ и более) при сравнительно низких температурах (ниже $0,3 \dots 0,4 T_{пл}$).

К получению зерен субмикрорекристаллического и нанокристаллического уровня методами ИПД приводит сочетание двух факторов: высокая интенсивность и существенная немонотонность деформации, осуществляемой при температурах не выше температуры протекания процесса рекристаллизации. Первый процесс обеспечивает необходимое генерирование дислокаций и эволюцию дислокационной структуры, а второй процесс – активизацию новых систем скольжения решеточных дислокаций и их взаимодействие с образующимися при деформации малоугловыми границами фрагментов, что приводит к их перестройке в высокоугловые границы общего типа.

На основе методов интенсивной пластической деформации получают массивные образцы, пригодные для испытания и создания реальных изделий на основе не только чистых металлов, но и промышленных сплавов.

Методы ИПД позволяют формировать субмикро- и нанокристаллические многофункциональные структуры с уникальным сочетанием таких особо важных для инженерных применений механических и эксплуатационных свойств, как высокие прочность и пластичность, высокая усталостная прочность, износостойкость.

При получении ультрамелкозернистых структур методами ИПД в металлах и сплавах не изменяется их исходный химический состав. Интенсивная пластическая деформация, являясь, по сути, новым применением методов обработки металлов давлением, имеет возможность встраиваться в существующие технологические цепочки на стадиях металлургического передела слитков – полуфабрикат или полуфабрикат – изделие.

Среди большого многообразия получаемых методами ИПД материалов особый интерес представляют титан и его сплавы; использование данных высокопрочных легких материалов возможно во многих инновационных отраслях промышленности, в том числе в авиационно-космической отрасли, в автомобилестроении, в медицине.

Исследованный в данной работе технически чистый титан ВТ1-0 с субмикрорекристаллической структурой (размер зерен ~ 250 нм, рис. 1) был получен с помощью метода всестороннейковки, который имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами ИПД.

В данном методе простые операции свободнойковки (осадка и протяжка) повторяются многократно со сменой оси прилагаемого деформирующего усилия, рис. 2.

Такая схема деформации позволяет сохранить форму и размеры заготовки, обеспечив ее интенсивную горячую деформацию, которая обычно сопровождается рекристаллизацией, даже в достаточно хрупких материалах и при сравнительно небольших удельных нагрузках на инструмент. Метод не требует дорогостоящего инструмента и позволяет использовать существующее технологическое прессовое оборудование.

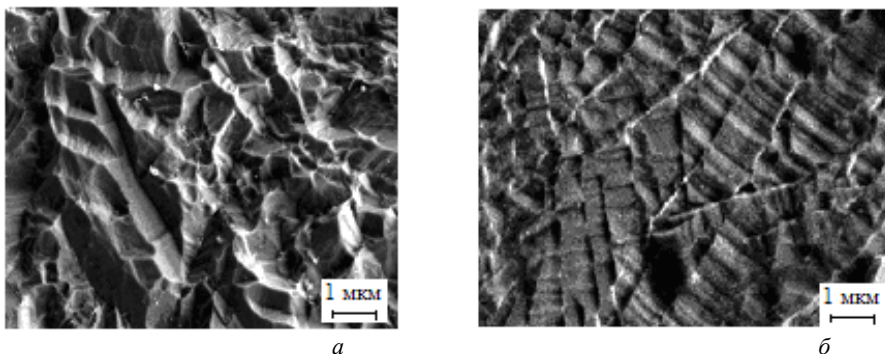


Рисунок 1 – Микроснимки структуры VT1-0 в исходном (крупнокристаллическом) состоянии (а) и в субмикроструктурном состоянии после всестороннейковки (б), полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа *Hitachi F-148*

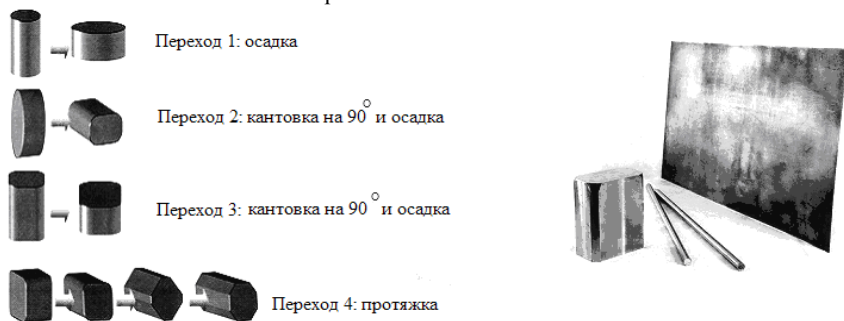


Рисунок 2 – Схема всестороннейковки (а) и наноструктурные полуфабрикаты из титановых сплавов (б), полученные данным методом

Формирование субмикро- и нанокристаллической структуры материалов в условиях ИПД, в частности, всестороннейковки, связано с большими деформациями сдвига путем накопления деформации в заготовках. В ходе интенсивной пластической деформации происходит искажение кристаллической решетки и формирование упругоискаженных областей с внутренними дальнедействующими напряжениями. Указанные факторы обуславливают нестабильность структуры и вероятность рекристаллизации при температу-

рах, более низких по сравнению с традиционными материалами (так называемой низкотемпературной рекристаллизации).

Метагстабильность зеренной структуры металла, частичная релаксация напряжений под действием температурного, силового и временного факторов могут привести к существенному росту зерна и, соответственно, к ухудшению механических свойств. Особую роль при этом играет тепловой фактор.

Поскольку конечные изделия из субмикро- и нанокристаллических материалов получают механической обработкой резанием, сопровождающейся интенсивным тепловыделением в зоне контакта инструмент – обрабатываемый материал, особую актуальность приобретает изучение стабильности структуры в процессах окончательной технологической обработки.

Исследование влияния режимов резания (скорости, подачи, глубины резания) на механические свойства субмикрорекристаллического титана ВТ1-0 проводилось на вертикально-фрезерном станке.

В качестве инструмента использовалась однозубая торцовая фреза из твердосплавного материала ВК8. Геометрические параметры режущей части фрезы: передний угол $\gamma = 0^\circ$; задний угол $\alpha = 20^\circ$; углы в плане $\varphi = 60^\circ$, $\varphi_1 = 30^\circ$; угол наклона главной режущей кромки $\lambda = 15^\circ$; фаска вдоль главной режущей кромки $f = 0,5$ мм.

При проведении экспериментальных исследований параметры режима резания варьировались в пределах: $V = 30 \dots 160$ м/мин, $S_z = 0,09 \dots 0,14$ мм/зуб с постоянной глубиной резания $t = 0,5$ мм.

Достаточно важную роль при исследовании процессов механической обработки материалов с субмикро- и нанокристаллической структурой играет анализ микротвердости, поскольку данная величина является не только важнейшей характеристикой механических свойств материалов, но и параметром, связанным со структурным состоянием материалов, а также напряженным состоянием поверхностных слоев, формируемых при резании.

В данной работе исследовалась микротвердость образцов титана в исходном крупнокристаллическом состоянии (горячекатаные прутки $\varnothing 15$ мм), в субмикрорекристаллическом состоянии после процесса всестороннейковки (заготовки шестигранной формы размером 25×20 мм), а также образцов после механической обработки с различными параметрами режима резания.

Микроиндентирование проводилось на микротвердомере ПМТ-3 с использованием алмазной пирамиды Виккерса. Нагрузка на индентор составляла $0,49$ Н. Значения величины микротвердости усреднялись по $9 \dots 10$ замерам.

Установлено, что микротвердость исходного крупнокристаллического технически чистого титана ВТ1-0 составляет 1800 МПа. Как показали измерения, микротвердость данного материала после всестороннейковки существенно выше – 2900 МПа, что характерно для субмикро- и нанокристаллических материалов, полученных ИПД, и достаточно хорошо коррелирует с литературными данными, табл. 1.

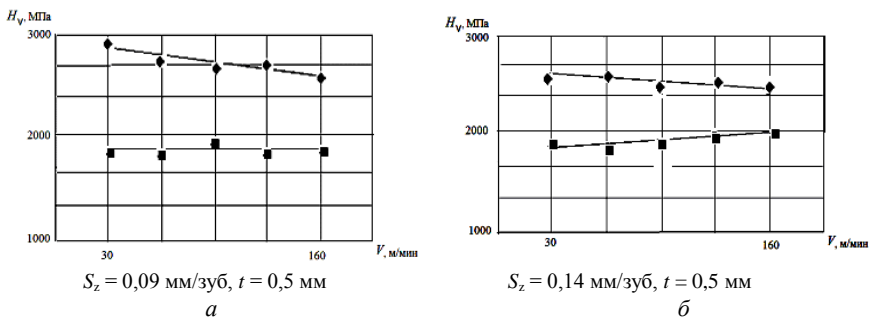
Таблица 1 – Физико-механические свойства ВТ1-0 (литературные и экспериментальные данные, полученные в работе)

Физико-механические свойства	Наноструктурное состояние	Крупнокристаллическое состояние
Плотность ρ , г/см ³	4,492	4,54
Предел прочности σ_B , МПа	960	460
Предел упругости $\sigma_{\text{упр}}$, МПа	434	238
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	725	380
Относительное удлинение δ , %	10	26
Относительное сужение ψ , %	45	60
Микротвердость H_v , МПа	2820 (2900*)	1800 (1800*)

* – экспериментальные данные, полученные в работе

В процессе механической обработки резанием микротвердость H_v образцов титана с крупно- и субмикрокристаллическим строением изменяется.

Экспериментальные зависимости микротвердости образцов от параметров режима резания приведены на рис. 3.



◆ субмикрокристаллическое состояние; ■ крупнокристаллическое состояние

Рисунок 3 – Зависимость микротвердости ВТ1-0 от параметров процесса резания

Анализ полученных результатов показал, что при обработке на низких значениях скорости резания и подачи ($V = 30$ м/мин и $S_z = 0,09$ мм/зуб) происходит незначительное снижение микротвердости у образца с субмикрокристаллической структурой (изменения в пределах погрешности измерений, которая составляет $\sim 5\%$). Увеличение скорости резания приводит к устойчивому снижению микротвердости – ее значение при $V = 160$ м/мин составляет ~ 2600 МПа, рис. 3, а, т.е. уменьшается по сравнению с исходным значением на 10% .

В образце с крупнокристаллической структурой при обработке во всем диапазоне указанных режимов величина микротвердости осталась практически неизменной, см. рис. 3, а.

Микроиндентирование образцов, обработанных при использовании аналогичного диапазона скоростей резания, но при увеличении подачи показал следующее. При изменении скорости резания от 30 м/мин до 160 м/мин и увеличении подачи до 0,14 мм/зуб наблюдалось стабильное снижение величины микротвердости в субмикрокристаллическом образце от 2550 МПа до 2400 МПа, при этом величина микротвердости в крупнокристаллическом образце несколько увеличилась – от 1800 МПа до 2000 МПа.

Для объяснения полученных результатов необходимо учесть, что микротвердость связана с как со структурным состоянием (химическим и фазовым составом, наличием дефектов кристаллического строения), так и напряженным состоянием поверхностного слоя материала, вклад которого весьма существенен для метастабильных нано- и субмикрокристаллических структур, полученных методами интенсивной пластической деформации. С учетом термодинамической нестабильности материалов, полученных ИПД, это состояние может существенно изменяться в процессе механической обработки, сопровождающейся развитием высоких температур и давлений.

Так, существенное снижение микротвердости образцов ВТ1-0, полученных ИПД, рис. 3, а, может быть объяснено частичной релаксацией напряженного состояния в поверхностном слое, что связано с повышением температуры в зоне резания вследствие повышения скорости резания.

При увеличении подачи интенсивность процесса снижения величины микротвердости субмикрокристаллического образца заметно меньше в связи с тем, что время действия теплового источника существенно сократилось.

Некоторое увеличение микротвердости крупнокристаллического образца, по всей видимости, объясняется наклепом поверхностного слоя в процессе механической обработки.

Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствуют о существенном влиянии параметров режима обработки (скорости резания, подачи) на механические свойства (микротвердость) образцов титана ВТ1-0 с субмикрокристаллической структурой, полученных методами ИПД (всесторонней ковкой).

Характер выявленных изменений существенно отличается для образцов титана с крупно- и субмикрокристаллическим строением.

Изменения микротвердости и, соответственно, напряженного состояния поверхностного слоя титана в процессе обработки, как предполагается, обусловлены структурным фактором – увеличением размера зерен материала, что связано, прежде всего, с изменением состояния неравновесных границ зерен, содержащих высокую плотность дефектов кристаллического строения, под влиянием существенного теплового воздействия при механической обра-

ботке. Это также подтверждается результатами исследования структуры с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Полученные результаты могут свидетельствовать о нестабильности структурного состояния полученных интенсивной пластической деформацией образцов технически чистого титана VT1-0 и возможном процессе низкотемпературной рекристаллизации его структуры, протекающем вследствие теплового воздействия при механической обработке резанием.

Для обеспечения высокого уровня физико-механических свойств функциональных изделий из субмикро- и нанокристаллического титана, получаемых механической обработкой, необходимо определение области рациональных режимов резания, которые обеспечат стабильность субмикро- и наноструктуры металла под воздействием динамического теплового поля в зоне резания.

Список использованных источников: 1. *Валиев Р.З.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 271 с. 2. *Валиев Р.З.* Создание металлов и сплавов с уникальными свойствами с использованием интенсивных пластических деформаций // Российские нанотехнологии, 2006. – Т.1, №1-2. – С.208-216. 3. *Верезуб Н.В.* Методология механических процессов обработки объемных нанокристаллических материалов / Н.В. Верезуб, Дж. Каптай, А.А. Симонова // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць, 2008. – Вип.2. – С. 19 - 26. 4. *Глезер А.М.* Физика мегапластической деформации / А.М. Глезер, Л.С. Метлов // ФТТ, 2010. – Т.52, вып. 6. – С. 1090-1098. 5. *Лякишев Н.П.* Наноматериалы конструкционного назначения / Н.П. Лякишев, М.И. Алымов // Российские нанотехнологии, 2006. – Т.1, №1. – С. 71 – 81. 6. *Переvezencev В.Н.* Теория аномального роста зерна в субмикроструктурных материалах, полученных методом интенсивной пластической деформации / В.Н. Переvezencev, А.С. Пупышин // ФММ, 2006. – Т.120, №1. – С. 33 - 37. 7. *Hornyak G., Dutta J., Tibbals H., Rao A.* Introduction to Nanoscience – CRC Press, N.Y., 2008 – 815 p.

Поступила в редколлегию 17.04.2011

Bibliography (transliterated): 1. Valiev R.Z. Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoy plasticheskoj deformaciej / R.Z. Valiev, I.V. Aleksandrov. – М.: Logos, 2000. – 271 s. 2. Valiev R.Z. Sozdanie metallov i splavov s unikal'nymi svojstvami s ispol'zovaniem intensivnyh plasticheskih deformacij // Rossijskie nanotehnologii, 2006. – Т.1, №1-2. – S. 208- 216. 3. Verezub N.V. Metodologija mehanicheskikh processov obrabotki ob#emnyh nanokristallicheskih materialov / N.V. Verezub, Dzh. Kaptaj, A.A. Simonova // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac', 2008. – Vip.2. – S. 19 - 26. 4. Glezer A.M. Fizika megaplasticheskoj deformacii / A.M. Glezer, L.S. Metlov // FTT, 2010. – Т.52, вып. 6. – S. 1090-1098. 5. Ljakishev N.P. Nanomaterialy konstrukcionnogo naznachenija / N.P. Ljakishev, M.I. Alymov // Rossijskie nanotehnologii, 2006. – Т.1, №1. – S. 71 – 81. 6. Perevezencev V.N. Teorija anomal'nogo rosta zerna v submikrokristalli#cheskih materialah, poluchennyh metodom intensivnoj plasticheskoj deformacii / V.N. Perevezencev, A.S. Pupyshin // FMM, 2006. – Т.120, №1. – S. 33 - 37. 7. Hornyak G., Dutta J., Tibbals H., Rao A. Introduction to Nanoscience – CRC Press, N.Y., 2008 – 815 p.