

### Пономаренко И.В., Повышение конструктивной прочности шатунных болтов ионной бомбардировкой

Рассмотрено влияние ионной бомбардировки титаном на механические свойства шатунных болтов. Установлено, что такая обработка значительно повышает конструктивную прочность изделий, особенно с конструктивными концентраторами напряжений:  $y_g$  возрастает на 69 %,  $y_{0,2}$  – на 84 % при сохранении показателей пластичности.

**Ключевые слова:** конструктивная прочность, конструктивные концентраторы напряжений, шатунный болт, ионная бомбардировка.

### Ponomarenko I. Improving structural strength of connecting-rod bolts

The effect of titanium ion bombardment on the mechanical properties of connecting-rod bolts is considered. It is found that such treatment significantly increases items structural strength, especially those that have structural stress concentrators:  $y_g$  increases by 69 %,  $y_{0,2}$  – by 84% without decreasing ductility.

**Key words:** structural items strength, structural stress concentrators, connecting-rod bolt, ion bombardment.

УДК 669.295:621.431.75

Канд. техн. наук Т. А. Коваленко

АО «Мотор Сич», г. Запорожье

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТАРЕНИЕ $\alpha + \beta$ -ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Исследовано влияние интенсивной пластической деформации методом винтовой экструзии на старение сложнлегированного титанового сплава VT25U. Показано, что распад метастабильных фаз сплава VT25U протекает непосредственно при интенсивной деформации при более низких температурах, чем при стандартном структурном состоянии сплава, с образованием дисперсной  $\alpha + \beta$ -структуры с повышенной твердостью.

**Ключевые слова:** титановый сплав, винтовая экструзия, субмикроструктурная структура, старение, метастабильная фаза, распад.

### Ведение и цель работы

На протяжении более чем 50-ти лет титановые сплавы успешно применяются для ответственных деталей газотурбинных двигателей (ГТД). За эти годы накоплен значительный опыт в области металловедения и технологий изготовления полуфабрикатов и деталей из титановых сплавов. Механические свойства существующих титановых сплавов имеют достаточно широкий интервал разброса и в отдельных случаях уже не отвечают новым требованиям, предъявляемым к предельно нагруженным деталям газотурбинных двигателей нового поколения (моноколеса, компрессорные рабочие лопатки и диски).

Анализ публикаций позволил сделать вывод о том, что набор легирующих элементов в титановых сплавах остается одинаковым в течение многих лет, недостаточно сведений о разработках новых режимов их термообработки. Как показано в работе Н.А. Ночовой [1], проблемы титановых сплавов могут быть решены на основе создания сплавов с нестандартной кристал-

лической структурой. К таким технологиям, позволяющим получить принципиально новое структурное состояние с повышенными механическими свойствами, можно отнести технологию интенсивной пластической деформации (ИПД), позволяющую измельчить структуру до субмикроструктурных (СМК) и наноразмеров.

В ранее проведенных исследованиях [2–4] показана эффективность ИПД для титановых сплавов, определены температуры структурных и фазовых превращений СМК титана, температуры рекристаллизации и полиморфного превращения СМК титановых сплавов. Установленные особенности позволили предположить, что кинетика старения субмикроструктурных титановых сплавов также может изменять свой характер под влиянием ИПД, что особенно актуально в условиях формирования СМК структуры в предварительно закаленных сплавах типа VT25U [5]. Кроме того, о возможном изменении механизмов фазово-структурных превращений под влиянием ИПД неоднократно отме-

чалось в публікаціях, що стосуються к алюмінієвим сплавам [6, 7]. В то же время для сложнотитановых сплавов таких сведений нет, что затрудняет выбор оптимальных режимов термообработки для стабилизации СМК структуры при сохранении повышенного комплекса свойств.

Поэтому целью настоящей работы являлось определение влияния интенсивной пластической деформации на старение сплава VT25Y для выявления связи между получаемыми свойствами и закономерностями структурообразования в ходе ИПД и последующего нагрева.

#### Методика, оборудование

Исходные заготовки вырезали из поковки штампованной сплава VT25Y (ОСТ190197). Интенсивную пластическую деформацию осуществляли методом винтовой экструзии (ВЭ) по технологии, разработанной ДонФТИ им. А.А. Галкина. Процесс ВЭ реализовывали на кривошипно-шатунном прессе с усилием 150 т. Особенности геометрии канала матрицы обеспечивали сохранение при экструзии идентичности начальной и конечной форм и размеров обрабатываемой заготовки (рис. 1), что позволило осуществлять ее многократную экструзию с целью накопления деформации. Максимальная величина деформации за один проход при ВЭ составляла  $e = 2$  [8]. Количество проходов при ВЭ изменялось от 1 до 5. Исследование микроструктуры проведено с применением микроскопа отраженного света «Observer.D1m» («Carl Zeiss») и во вторичных электронах с помощью электронного микроскопа JSM-6360LA. Твердость определяли по ГОСТ 9450-76.

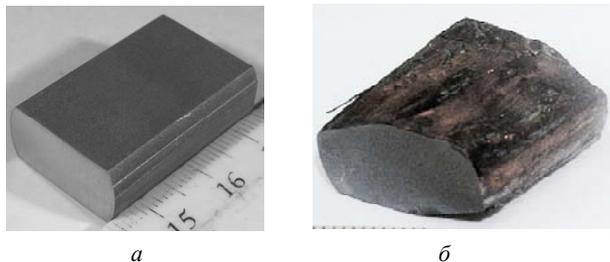


Рис. 1. Внешний вид заготовки из сплава VT25Y до (а) и после ИПД (б) методом винтовой экструзии (ВЭ)

#### Результаты исследований, их обсуждение

Исходные заготовки для повышения деформационной способности перед винтовой экструзией подвергали закалке с температуры на  $5^\circ\text{C}$  ниже начала полиморфного превращения сплава VT25Y [5]. Микроструктура заготовок после закалки состояла из зерен первичной  $\alpha$ - фазы и мартенситной  $\alpha''$ - фазы, размеры которых находились в пределах  $5 \dots 10$  мкм (рис. 2). Более высокая пластичность титановых сплавов с  $\alpha''$ -структурой обусловлена неполным смещением атомов в процессе перестройки ОЦК- решетки в ГПУ- решетку и релаксацией возникших при этом напряжений пу-

тем двойникования [9]. Об образовании  $\alpha''$ - фазы также свидетельствовало снижение твердости сплава после закалки с 34 HRC до 27 HRC.

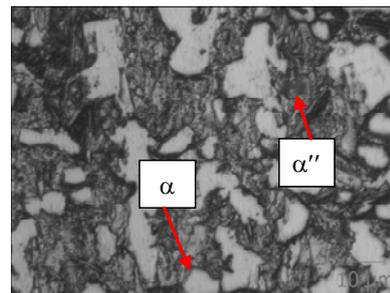


Рис. 2. Микроструктура исходной для ИПД заготовки из сплава VT25Y,  $\times 1000$

Известно, что распад метастабильной  $\alpha''$ - фазы при стандартном микроструктурном состоянии сплава VT25Y происходит при температуре  $60^\circ\text{C}$  по типу промежуточного превращения путем расслоения, с образованием участков обедненной  $\beta$ - стабилизирующими элементами  $\alpha''$ - фазы, которые превращаются в  $\alpha$ - фазу с формированием стабильной  $\alpha+\beta$ - структуры [9]. Исследование структуры сплава VT25Y после двух проходов ВЭ показало, что на светлом фоне структуры закалки из  $\alpha$ - и  $\alpha''$ - фаз просматривались отдельные участки с более темным оттенком травимости (рис. 3, а, б). Анализ микроструктуры при более высоких разрешениях позволил установить, что в темных участках структура сплава представляла собой  $\alpha$ - и  $\beta$ - фазы (рис. 3, в), что свидетельствовало о протекании процессов распада непосредственно при ИПД – деформационном старении. Как показало исследование, на первых проходах ВЭ старение протекало в отдельных микрообъемах сплава, в результате последующей обработки методом ВЭ и накопления деформации в сплаве VT25Y формировалась структура из  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз субмикроструктурных размеров (рис. 4). Таким образом, деформационное старение приводило к упрочнению сплава VT25Y как за счет дисперсных частиц вторичной  $\alpha$ - фазы, выделившейся при старении, так и за счет дополнительного измельчения зерна, что проявлялось в повышении твердости до  $38 \dots 40$  HRC.

В то время как стандартная температура старения сплава VT25Y находилась в пределах  $600^\circ\text{C}$ , исследованием установлено, что под влиянием ИПД эта температура снижалась на  $70 \dots 100^\circ\text{C}$ . По-видимому, ИПД интенсифицировала процесс старения и ускоряла распад метастабильной  $\beta$ -фазы за счет формирования субмикроструктурной структуры и повышения плотности дислокаций, что способствовало выделению дисперсных фаз уже в ходе деформации. Кроме того, исследованием структуры с применением электронного микроскопа установлено, что после ВЭ в сплаве VT25Y продукты распада значительно дисперснее ( $1 \dots 2$  мкм), чем в стандартном структурном состоянии сплава ( $3 \dots 5$  мкм). О формировании грубых выделе-

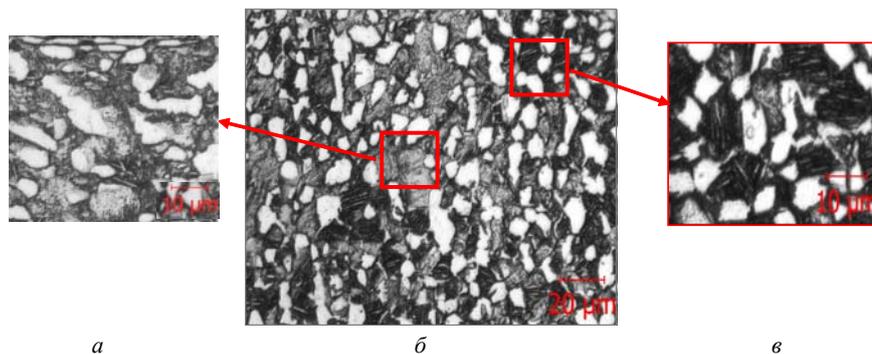


Рис. 3. Микроструктура сплава VT25У после ИПД методом винтовой экструзии (2 прохода): *a* – участки с  $(\alpha+\alpha')$ -структурой,  $\times 1000$ ; *б* – микрооднородная структура,  $\times 500$ ; *в* – участки с  $\alpha+\beta$ -структурой,  $\times 1000$

ний вторичной  $\alpha$ - фазы, с неравномерным распадом после стандартной термомеханической обработки  $\alpha+\beta$ - сплава, также отмечено в работе М.И. Шишкина [10].

Таким образом, после каждого прохода ВЭ в предварительно закаленном сплаве VT25У реализовано упрочнение как за счет интенсивной деформации, так и за счет распада метастабильной  $\alpha''$ - фазы. Причем, в процессе ИПД происходило ( $\alpha'' \rightarrow \alpha'$ )- превращение, которое на первых трех проходах ВЭ вызывало некоторое повышение пластичности. С увеличением количества проходов и соответственно повышением степени деформации происходила сдвиговая деформация  $\alpha''$ - и  $\alpha'$ - фаз, распад мартенситной структуры на  $\alpha$ - и  $\beta$ - фазы, что вызывало снижение пластичности и затрудняло реализацию последующих проходов ИПД. Поэтому, необходимо назначать температуру каждого прохода ВЭ для сплава VT25У индивидуально и опытным путем определять температуру последнего деформационного воздействия, которое окончательно формирует структуру.

### Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что ИПД способствовала более интенсивному и равномерному распаду метастабильных фаз сплава VT25У с образованием дисперсной гетерогенной  $\alpha+\beta$ -структуры, что обусловило повышение твердости сплава. Таким образом, в предварительно закаленном сплаве VT25У при винтовой экструзии происходило деформационное старение, что позволяет рассматривать возможность применения заготовок из данного сплава после ИПД без дополнительной упрочняющей термообработки.

### Список литературы

1. Ночовная Н. А. Проблемы повышения ресурсных характеристик жаропрочных титановых сплавов / Н. А. Ночовная, В. Г. Анташев // Технология легких сплавов. – 2008. – № 3. – С. 28–33.
2. Коваленко Т. А. Формирование стабильной субмикрористаллической структуры в титане / Т. А. Коваленко, А. В. Овчинников // МиТОМ. – 2010. – № 2. – С. 35–43.

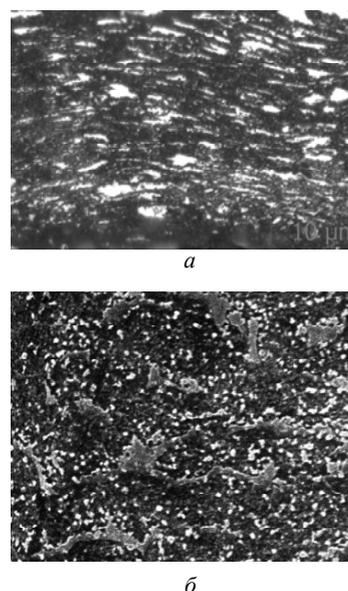


Рис. 4. Микроструктура сплава VT25У после ИПД методом винтовой экструзии (5 проходов):

*a* –  $\times 1000$  (оптика), *б* –  $\times 10000$  (РЭМ)

3. Овчинников А. В. Получение заготовок субмикрористаллических  $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов из слитков / А. В. Овчинников, Т. А. Коваленко // Теория и практика металлургии. – 2010 – № 5–6. – С. 11–15.
4. Влияние интенсивной пластической деформации на критическую температуру  $A_{c3}$  титанового сплава VT8 / [Т. А. Коваленко, И. А. Овчинникова, О. С. Омельченко, Т. А. Глотка] // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научн. тр. – Дн-вск : ПГСА, 2011. – Вып. 58. – С. 407–412.
5. Повышение деформационной способности жаропрочного титанового сплава VT25У / [Т. А. Глотка, М. Н. Перепелкина, Т. А. Коваленко, В. Г. Шевченко] // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научн. тр. – Дн-вск : ПГСА, 2013. – Вып. 67. – С. 388–391.
6. Получение объемных металлических нано- и субмикрористаллических материалов методом интенсивной пластической деформации / [С. В. Добаткин, А. М. Арсенкин, М. А. Попов и др.] // – МиТОМ. – 2005. – № 5. – С. 29–34.

7. Влияние ИПД на процессы старения в Al-Sc и Al-Sc-Ta сплавах / [А. Л. Березин, О. А. Молебный, А. А. Давиденко и др.] // тезисы II междунар. научн. конф. «Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь-Россия-Украина», Киев, 19–22 октября 2010 г. – К. : 2010. – 346 с.
8. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации / [Бейгельзимер Я. Е., Варюхин В. Н., Орлов Д. В. и др.]. – Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.
9. Возврат при старении в промышленных титановых сплавах / [Л. П. Лужников, В. М. Новикова, А. П. Мареев и др.] // МиТОМ. – № 12. – 1967. – С. 2–7.
10. Шишкина М. И. Влияние ВТМО на структуру и свойства сплава VT3-1 / М. И. Шишкина, В. С. Томсинский // МиТОМ. – 1977. – № 2. – С. 61–63.

Одержано 07.02.2014

**Коваленко Т.О. Вплив інтенсивної пластичної деформації на старіння  $\alpha+\beta$ - титанового сплаву**

*Досліджено вплив інтенсивної пластичної деформації методом гвинтової екструзії на старіння складнолегованого титанового сплаву VT25U. Показано, що розпад метастабільних фаз сплаву VT25U відбувається безпосередньо при інтенсивній деформації при більш низьких температурах, ніж за умов стандартного структурного стану сплаву, з утворенням дисперсної  $\alpha+\beta$ - структури із підвищеною твердістю.*

**Ключові слова:** титановий сплав, гвинтова екструзія, субмікрокристалічна структура, старіння, метастабільна фаза, розпад.

**Kovalenko T. Influence of the intensive plastic strain on the  $(\alpha+\beta)$ -titanium alloy ageing process**

*The influence of intensive plastic strain by screw extrusion method on doped titanium alloy VT25U ageing processes has been researched. It is shown than metastable phases of VT25U alloy decay progresses directly in intensive plastic strain process with lower temperatures, than with standard structural state of an alloy, and with formation of disperse  $\alpha+\beta$ - structure that has higher strength.*

**Key words:** titanium alloy, screw extrusion, submicrocrystalline structure, ageing, metastable phase, decay.

УДК 669.786:669.15 – 194.55

Канд. техн. наук В. Я. Грабовський<sup>1</sup>, В. І. Канюка<sup>2</sup>, О. О. Сліпченко<sup>1</sup><sup>1</sup>Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя<sup>2</sup>ДП «УкрНДІспецсталь», м. Запоріжжя

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ СЛУЖБОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОСТІЙКОЇ ШТАМПОВОЇ СТАЛІ 5Х3В3МФС (ДИ23) ПРИ ЛЕГУВАННІ ЇЇ АЗОТОМ

*Показано, що при легуванні теплостійкої штампової сталі 5Х3В3МФС (ДИ23) азотом до 0,20 % в структурі утворюються крупні (до 20 мкм) частинки нітридів ванадію, що не розчиняються при температурі гартування. Наслідком є зменшення частки ванадію, що бере участь у карбідному зміцненні при відпусканні. Цим пояснюється встановлена в роботі відсутність позитивного впливу легування азотом на стримання зростання зерна аустеніту, теплостійкість, високотемпературні механічні властивості та працездатність сталі.*

**Ключові слова:** штампова сталь 5Х3В3МФС, легування азотом, мікроструктура, нітриди ванадію, теплостійкість, механічні властивості.

Підвищення властивостей інструментальних сталей із застосуванням особливостей економного легування є актуальною проблемою, оскільки дозволяє забезпечити покращення показників експлуатаційних характеристик при зменшенні витрат. З огляду на це перспективним є використання азоту, як легувального елемента, ефективність чого встановлена переважно для нержавіючих конструкційних та швидкорізальних сталей [1–5]. Існують також повідомлення щодо позитив-

них результатів такого легування штампових сталей для гарячого деформування [6–9]. Водночас механізм впливу азоту на зміну мікроструктури та формування властивостей штампових сталей потребує детального дослідження. Особливо складною та кінцево не встановленою є роль азоту, як легувального елемента, в штампових сталях високої теплостійкості. Підвищений вміст комплексу легувальних елементів ускладнює та робить непередбачуваним вплив азоту на їх характери-