

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОУДАРНОЙ СТОЙКОСТИ ПРЕГРАД ИЗ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО И КРУПНОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА**

А.Н. Ищенко, В.В. Буркин, А.Н. Табаченко, С.А. Афанасьева, Н.Н. Белов, Е.Ф. Дударев, К.С. Рогаев, М.В. Хабибуллин, Н.Т. Югов  
*Томский государственный (национальный исследовательский) университет*

s.a.afanasyeva@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты исследования образцов ультрамелкозернистого и крупнозернистого титана, полученных методом *авс*-прессования при повышенных температурах, их механических свойств при квазистатическом нагружении, результаты экспериментального и математического моделирования высокоскоростного соударения пластин из титана со сферическим стальным ударником. Показано, что при переходе от крупнозернистой структуры к ультрамелкозернистой улучшаются механические свойства сплава ВТ1-0, однако на результат высокоскоростного удара это практически не влияет.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время титан – один из важнейших конструкционных металлических материалов. Основными преимуществами титановых сплавов перед другими конструкционными материалами являются их небольшой удельный вес при высокой удельной прочности и жаропрочность в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. В связи с этим титан успешно используется как броневой металл.

Анализ литературных данных по увеличению механической прочности металлических сплавов [1, 2], показывает, что это можно осуществить путем создания ультрамелкозернистой (нано) структуры в сплаве на основе титана. Исследование свойств ультрамелкозернистого титана в условиях ударно-волнового нагружения представляют актуальную задачу. В работе [3] получены результаты экспериментального и математического моделирования закономерностей и механизма разрушения крупнозернистого и ультрамелкозернистого титана при ударно-волновом воздействии наносекундного релятивистского сильноточного электронного пучка. При обеих зеренных структурах установлены общие закономерности и особенности разрушения при квазистатическом и ударно-волновом нагружении. В данной работе продолжены исследования по ударно-волновому нагружению крупнозернистого и ультрамелкозернистого титана. Представлены результаты по получению ультрамелкозернистого титана, эксперимента по высокоскоростному соударению пластин из титана со сферическим стальным ударником и расчета в рамках математической модели [4].

### **РАЗРАБОТКА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА И ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

На примере однофазного сплава ВТ1-0 показана возможность формирования его ультрамелкозернистой структуры. Ультрамелкозернистое состояние сплава ВТ1-0 было сформировано при *авс*-прессовании при повышенных температурах в специальной прессформе. Чтобы уменьшить размер зерен и сузить интервал распределения зерен по размерам, на заключительной стадии *авс*-прессования температура составляла 623 К. При этом режиме интенсивной пластической деформации сформировалась изотропная структура со средним размером зерен 0.2 мкм с распределением зерен по размерам в интервале 0.1 – 1.0 мкм. Крупнозернистая пластина из титана ВТ1-0 получена из заготовки (средний размер зерен 20 мкм) методом электро-эрозионной резки. На рис. 1 и табл. 1 приведены данные об изготовленных образцах (толщина  $h_{обр}$ , плотность  $\rho_0$ , твердость).

Механические свойства образцов измерялись при комнатной температуре. Прочностные свойства определяли методом растяжения плоских образцов в виде двойной лопатки. Кривые течения рассчитывали по полученным диаграммам нагружения «нагрузка – удлинение образца». При расчете напряжения течения использовали начальную площадь поперечного сечения образца, то есть рассчитаны так называемые инженерные диаграммы растяжения.

У однофазного сплава ВТ1-0 в крупнозернистом рекристаллизованном состоянии зависимость «напряжение  $\sigma$  – степень пластической деформации  $\varepsilon_p$ » имеет вид, характерный для поликристаллических металлов (рис. 2, кривая 1). Коэффициент упрочнения непрерывно уменьшается вплоть до начала локализации пластической деформации на макромасштабном уровне, то есть до момента начала образования «шейки» на образце при  $\sigma$ , равном пределу прочности  $\sigma_B = 475$  МПа. Падение напряжения  $\sigma$  на кривой  $\sigma(\varepsilon_p)$  на стадии развития шейки является следствием того, что расчет  $\sigma$  проводился, во-первых, без учета уменьшения площади поперечного сечения образца и, во-вторых, без учета неоднородности пластической деформации на макромасштабном уровне.

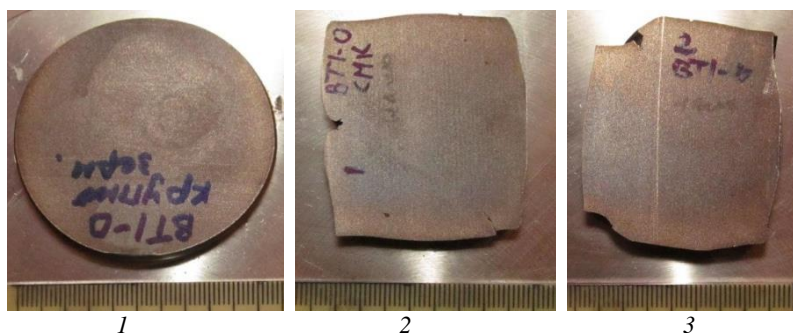


Рис. 1 Защитные пластины из крупнозернистого (1) и ультрамелкозернистого (2,3) титана BT1-0

Таблица 1. Свойства защитных материалов

Образец	$h_{\text{обр.}}$ , мм	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость, ед. HRA
1	9.33	4.51	57
2	9.05	4.51	64
3	9.05	4.51	64

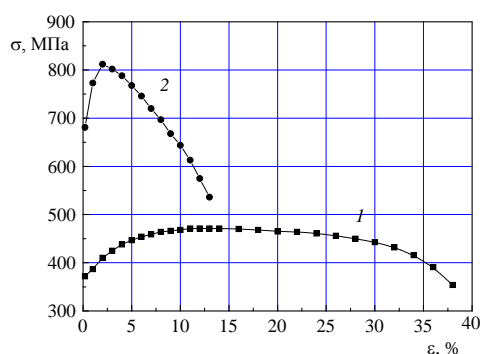


Рис. 2. Кривые течения крупнозернистого (1) и ультрамелкозернистого (2) титан BT1-0

При переходе от крупнозернистой структуры к ультрамелкозернистой вид зависимости «напряжение  $\sigma$  – степень пластической деформации  $\epsilon_p$ » сильно изменяются. Во-первых, сокращается по величине деформации стадия до начала локализации пластической деформации на макромасштабном уровне, то есть, до достижения предела прочности  $\sigma_B$  (максимум на кривой) и относительное удлинение  $\delta$  (разность значений длины образца до и после деформации) (рис. 2), причем макролокализация пластической деформации происходит не в виде «шейки», а в виде макрополосы. Во-вторых, примерно в 2 раза увеличиваются предел текучести  $\sigma_{0.2}$  (значения напряжения в начале кривых 1 и 2 на рис. 2) и предел прочности  $\sigma_B$ , а также сильно возрастает коэффициент упрочнения при  $\sigma < \sigma_B$ , но при этом уменьшается относительное удлинение до разрушения  $\delta$ .

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЛЬНЫХ УДАРНИКОВ С СОСТАВНЫМИ МИШЕНЯМИ, СОДЕРЖАЩИМИ КРУПНОЗЕРНИСТЫЙ И УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ ТИТАН

С целью определения противоударной стойкости пластин из крупнозернистого и ультрамелкозернистого титана проведены баллистические испытания соударения стальных сферических ударников с составными мишенями, содержащими образцы исследуемых материалов, расположенных на преграде – «свидетеле», в качестве которого использовались круглые диски из сплава Д16Т диаметром 160 мм и толщиной 70 мм. Наряду с характеристиками кратера в «свидетеле» определялась величина эквивалентной глубины кратера  $L_{\text{экв}} = h + h_{\text{обр.}} \cdot \rho_0 / \rho_d$ , где  $\rho_0 = 4.51$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_d = 3.9$  г/см<sup>3</sup> – плотность Д16Т. В табл. 2 приведены результаты экспериментов ( $V_0$  – скорость удара;  $m$  – масса ударника;  $d$  – диаметр ударника;  $h$  – глубина кратера в «свидетеле»). За базовую точку исследования принят эксперимент 1.

Таблица 2. Результаты экспериментов

№ эксперимента	$V_0$ , м/с	$m$ , г	$d$ , мм	Образец	$h_{\text{обр.}}$ , мм	$h$ , мм	$L_{\text{экв}}$ , мм
1	2595	2.18	8.00	Д16Т	70	19.47	
2	2440	2.18	8.00	1	9.3	6.04	18.73
3	2412	2.16	8.00	2	9.0	6.76	19.84
4	2470	2.16	8.00	3	9.0	6.85	19.29

На рис. 3 приведены результаты эксперимента и расчета, повторяющие условия опыта (распреде-

ние вектора скорости, давления в поле течения,  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  – максимальное и минимальное давление), взаимодействия стального сферического ударника с составной мишенью из плитки крупнозернистого титана №1 (табл. 1) толщиной 9.3 мм, закрепленной на «свидетеле», при скорости соударения  $V_0 = 2440$  м/с. В эксперименте ударник, деформируясь и «срабатываясь», проникает в титановую пластину, затем в «свидетель» вместе с титановой прослойкой и останавливается. В «свидетеле» образуется кратер глубиной  $h = 6.04$  мм.

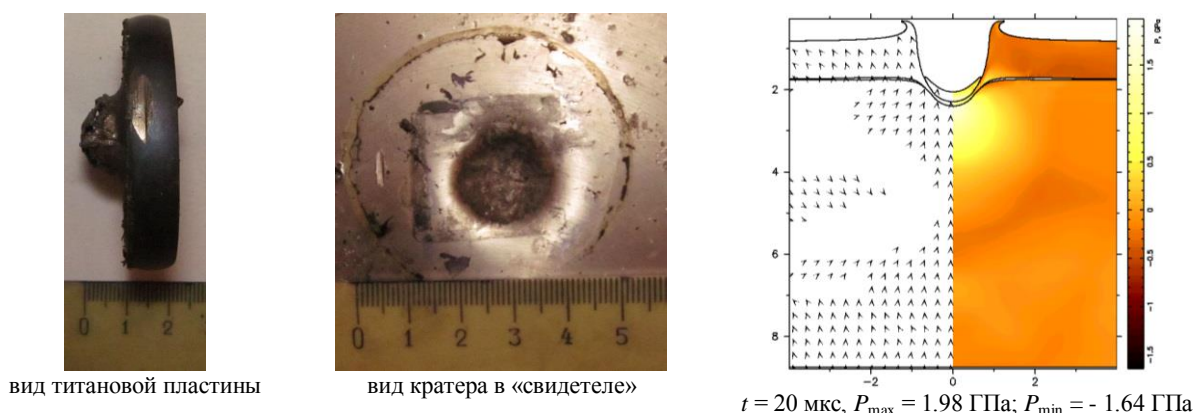


Рис. 3. Результаты взаимодействия стального сферического ударника с составной мишенью, состоящей из плитки крупнозернистого титана, закрепленной на дюралюминиевом цилиндре, при  $V_0 = 2440$  м/с

На рис. 4 приведены данные взаимодействия стального сферического ударника с составной мишенью из плитки ультрамелкозернистого титана № 3 толщиной 9 мм, закрепленной на «свидетеле», при скорости соударения  $V_0 = 2470$  м/с. В эксперименте ударник, деформируясь и «срабатываясь», проникает в титановую пластину, затем в «свидетель» вместе с титановой прослойкой и останавливается. В «свидетеле» образуется кратер глубиной  $h = 6.76$  мм.

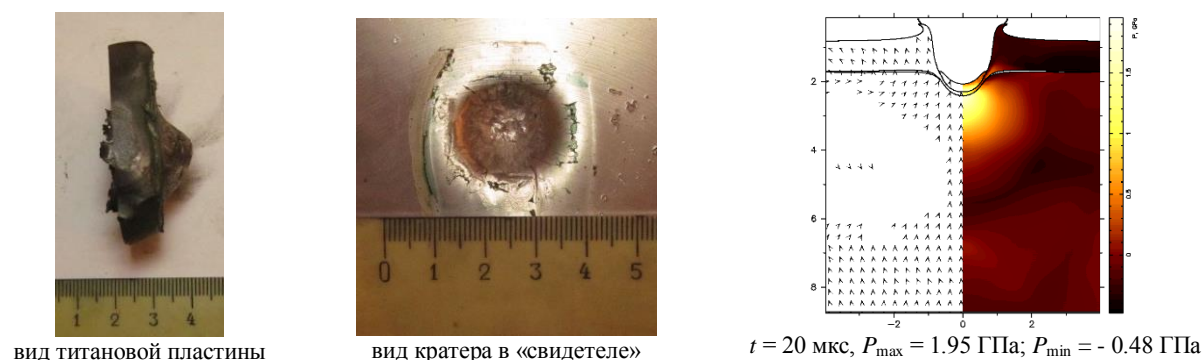


Рис. 4. Результаты взаимодействия стального сферического ударника с составной мишенью, состоящей из плитки ультрамелкозернистого титана, закрепленной на дюралюминиевом цилиндре, при  $V_0 = 2440$  м/с

Сопоставление результатов экспериментов соударения стального сферического ударника с образцами титана ВТ1-0 в исследуемом диапазоне скоростей  $\sim 2500$  м/с не показало существенного улучшения защитных свойств титана при переходе от крупнозернистой к ультрамелкозернистой микроструктуре.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-08-04118 а.

#### Литература

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
2. Дударев Е.Ф., Грабовецкая Г.П., Колобов Ю.Р., Бакач Г.П., Кашин О.А., Жу Ю.Т. // Металлы. 2004. № 1. С 87-95.
3. Дударев Е.Ф., Афанасьева С.А., Бакач Г.П., Белов Н.Н, Марков А.Б., Табаченко А.Н., Хабибуллин М.В., Югов Н.Т., Малеткина Т.Ю. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57 (11). С. 12-17.
4. Хабибуллин М.В., Афанасьева С.А. Расчет явлений, происходящих в конденсированных средах в результате интенсивных импульсных воздействий, в осесимметричной постановке // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012617301. М., 2012. 80 с.