

ИНИЦИИРОВАНИЕ И *IN SITU* ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СПЛАВАХ В УСЛОВИЯХ КРУЧЕНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Белоусов Н.Н.¹, Варюхин В.Н.¹, Вьюненко Ю.Н.², Черняева Е.В.³

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А.Галкина, г. Донецк,
e-mail: bilniknik52@gmail.com

²ООО "Оптмикст ЛТД", Санкт-Петербург, Россия, e-mail: 6840817@mail.ru

³Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург,
Россия, e-mail: lena@smel.math.spbu.ru

Актуальность. В настоящее время на основе современных достижений физики высоких давлений и физики прочности (пластичности) возникло новое научное направление, связанное с изучением влияния экстремальных параметров мегапластических деформаций на особенности инициирования структурно-фазовых изменений в метастабильных материалах. Наиболее актуальным является изучение деформационных условий нарушения структурно-фазовой стабильности экономно-легированных сплавов, в первую очередь, высокоазотистых сталей (ВАС).

Цель работы: инициировать процесс деформационной стимуляции структурно-фазовых изменений в метастабильных высокоазотистых сталях в условиях мегапластической деформации (МПД) в наковальнях Бриджмена, а также исследовать характер взаимосвязи между структурно-фазовыми состояниями и физико-механическими свойствами ВАС в условиях нарушения структурно-фазовой стабильности как в объеме, так и на поверхности.

Материалы и методика эксперимента. Для инициирования деформационной стимуляции структурно-фазовых изменений в метастабильных сплавах разработана и изготовлена многофункциональная МПД-установка типа наковальни Бриджмена с кручением. Использовались наковальни в виде усечённых конусов из металлокерамического сплава ВК-6 ($P \leq 8$ ГПа) и стали ШХ15 ($P \leq 3$ ГПа). Изготавливались образцы в виде дисков диаметром $3 \div 10$ мм и толщиной $0.01 \div 0.05$ мм, которые вначале подвергались одноосному сжатию, а затем деформации сдвига.

Процессы МПД инициировали в различных условиях: 1) квазигидростатического давления, путем помещения образца в специальный контейнер-гasketку; 2) радиальной экструзии при свободном течении между наковальнями (при сжатии и кручении). Установка МПД позволяет инициировать и проводить *in situ* исследования структурно-фазовых изменений в различных материалах при заданных технологических параметрах: а) деформировать образец непосредственно в устройствах гидравлического пресса и регистрировать деформационные кривые сжатия; б) записывать кривые деформации сдвига при кручении путем непрерывной регистрации крутящего момента (метод Бриджмена); в) управлять деформационно-скоростными параметрами: скоростью кручения наковален: $\Delta n/\Delta t = 0.04 \div 4$ об/мин (шаг 0.02 об/мин), скоростью сжатия: $\Delta P/\Delta t = 0.02 \div 10$ ГПа/мин (шаг 0.01 ГПа/мин); г) устанавливалась зависимость угла поворота φ от величины крутящего момента M (в пределах $M = 0.5 \div 150$ Н·м) для различных значений напряжения сжатия; д) методами резистометрии и акустической эмиссии контролировать *in situ* процессы сдвиговой мегапластической деформации, включая: нарушение структурно-фазовой стабильности, термомеханическую неустойчивость (скачкообразность) МПД, ротационные межкристаллитные сдвиги, деформационное и аккомодационное сбросообразование, зарождение и развитие полос сдвига, зарождение и формирование дефектной структуры из микротрещин, развитие магистральной трещины и непосредственно процесс разрушения; е) выбирать и управлять рабочими режимами: векторный, моментный и реверсный; з) изменять с заданной

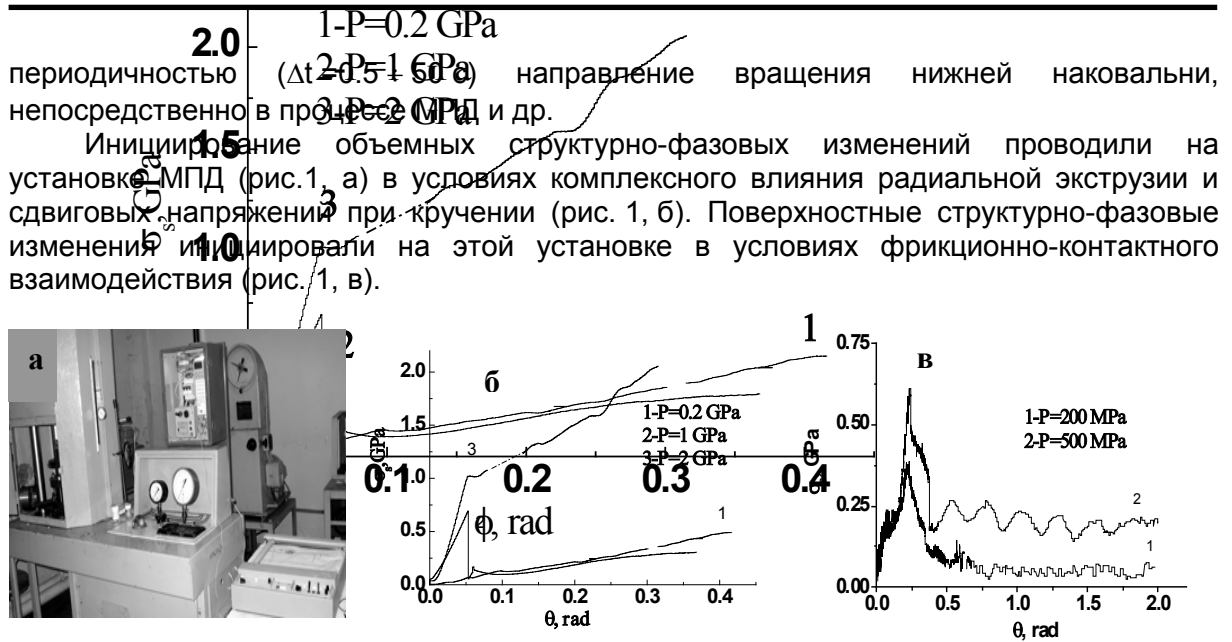


Рисунок 1- Общий вид МПД-установки Бриджмена с контролируемым сдвигом (а); кривые непрерывной регистрации крутящего момента при объемной (б) и поверхностной деформациях (в)

В процессе МПД одновременно с кривыми деформации регистрировали сигналы акустической эмиссии (АЭ). Для регистрации и преобразования АЭ-сигналов в электрические применяли широкополосные датчики в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот. Для исследования физико-механических свойств МПД-образцов, применен метод динамического микроиндентирования (ДМИ). Характеристики метода ДМИ: точность измерения силы: $\Delta F = \pm 5 \cdot 10^{-4}$ N; точность измерения перемещения: $\Delta L = \pm 2 \cdot 10^{-4}$ мм; скорость внедрения алмазного индентора: $\Delta L/\Delta t = 10^{-4} \div 0.1$ мм/мин; оптическая точность измерения размеров микротрещин в окрестности отпечатка: $\Delta l = \pm 2 \cdot 10^{-3}$ мм. При ДМИ определяли следующие параметры: коэффициент интенсивности напряжений первого рода K_{Ic} (трещиностойкость), невосстановленная микротвердость $H_{и}$, длина радиальных трещин C , эффективная (поверхностная) энергия разрушения W_p , индекс хрупкости f_c , критерий микрохрупкости γ и др. В процессе ДМИ измеряли параметры акустической эмиссии: среднеквадратичные значения амплитуды, энергию и медианную частоту АЭ-сигналов. Сигналы АЭ инициировали путем внедрения алмазного и твердосплавного конического инденторов на деформационных машинах 2167P-50 и ИМ-4А, соответственно, с записью и обработкой кривых внедрения индентора Виккерса.

В качестве основного материала исследований выбрана ВАС типа X18AG10H16 ($C_N = 0.06, 0.3, 0.5$ и $1.1\%N$). Объемные структурно-фазовые изменения инициировались МПД-методом при $n \geq 2$ об. под давлением $P \geq 3$ ГПа, поверхностные - при $n \geq 10$ об., $P \leq 1$ ГПа в условиях фрикционно-контактного взаимодействия.

Основные результаты исследований. Методом РСА обнаружена структурно-фазовая нестабильность в условиях мегапластической деформации со сдвигом. Для стали X18AG10H16 ($C_N = 0.06\% N$) в деформационно-силовых условиях ($P \geq 0.7$ ГПа, $n \geq 5$) обнаружено нарушение стабильности γ -фазы с образованием α -фазы. Начало фазовой дестабилизация коррелировало с немонотонным изменением электросопротивления и интенсивности сигналов акустической эмиссии, что подтверждало неустойчивость процесса структурно-фазовых изменений в условиях фрикционно-контактного взаимодействия.

Прекращение деформации сдвига сопровождалось: 1) релаксацией напряжений; 2) исчезновением акустической эмиссии; 3) стабилизацией температуры и электросопротивления; 4) остаточными структурно-фазовыми изменениями.

Методом ДМИ показано, что процесс структурно-фазовой неустойчивости характеризовался уменьшением модуля Юнга и выходом на насыщение деформационных зависимостей механических параметров. При микроиндентировании образцов X18AG10N16 ($C_N = 0.06\% N$) в условиях структурно-фазовой неустойчивости обнаружено заметное увеличение прочности (рис.2). Кроме этого, полученные значения коэффициента скоростной чувствительности в условиях структурно-фазовой неустойчивости указывают на возможность повышения пластичности.

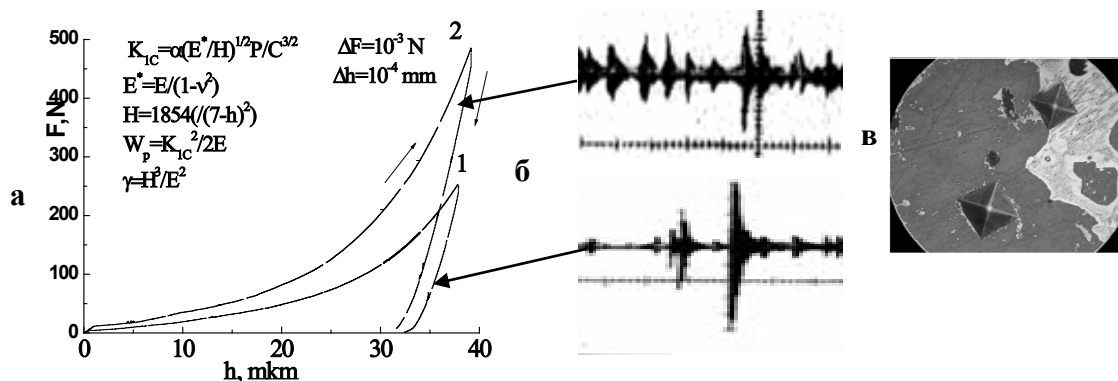


Рисунок 2 - Кривые ДМИ образцов ВАС после МПД поверхности (а): $e = 0.2$, (кр. 1); $e = 2$ (кр. 2); осциллограммы акустических импульсов в процессе ДМИ (б): скорость развёртки 50 мкс/см, усиление 0,02 в/см; микроотпечатки на поверхности (в)

Методом ДМИ предпринята попытка установления экспериментальной зависимости между параметрами внутризеренной структуры и сопротивляемостью поверхностной структуры зарождению и распространению трещин по оценке величины критического коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} . Экспериментально обнаружено, что чем меньше размеры блоков и больше их разориентация, тем больше коэффициент трещиностойкости K_{1c} . Показано, что чем больше величина K_{1c} , тем при большей длине трещины, и при большем напряжении поверхностная структура сопротивляется разрушению. Это открывает возможности повышения механических свойств объёмных материалов путём формирования поверхностных структур с повышенной трещиностойкостью. Впервые обнаружено, что неустойчивое структурно-фазовое состояние обладает наведенной намагничённостью. Данная намагничённость имеет деформационную природу и, вероятно, может быть обусловлена изменением структурно-фазового и энергетического состояния межзеренного пространства.

Заключение. Таким образом, обнаружена деформационно-стимулированная пластичность материалов, вызванная структурно-фазовой неустойчивостью, полученной в условиях экстремально высоких значениях деформации сдвига и давления, показана возможность управления свойствами ВАС, путем целенаправленных структурно-фазовых изменений в объеме и на поверхности.