

PACS: 62.50.+p, 81.40.Vw, 81.40.Rs

А.И. Дерягин<sup>1</sup>, В.В. Милявский<sup>2</sup>, Б.М. Эфрос<sup>3</sup>, В.А. Завалишин<sup>1</sup>,  
Л.В. Лоладзе<sup>3</sup>, Н.Б. Эфрос<sup>3</sup>

## ВЛИЯНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА СТАЛИ 05Г20С2

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН  
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620219, Россия

<sup>2</sup>Институт теплофизики экстремальных состояний РАН  
ул. Ижорская, 13/19, г. Москва, 127412, Россия

<sup>3</sup>Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

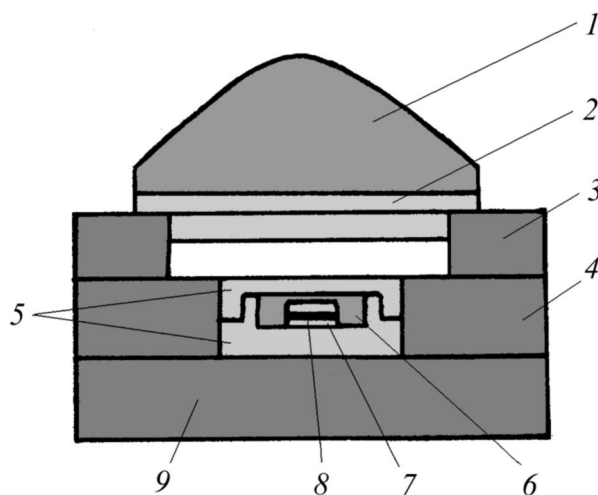
*Исследовано влияние ударно-волнового нагружения на образцы стали 05Г20С2. Показано, что образцы, подвергнутые адиабатическому ударно-волновому сжатию импульсом давления 45 GPa длительностью 1 мкс, испытывают частичное обратное  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение, обусловленное экстремально высоким давлением.*

Экстремальные плотности энергии, высокие давления, сдвиговые напряжения в ударной волне могут вызвать различные фазовые переходы в сплавах. Ранее было исследовано влияние высокого давления на фазовые превращения в сталях. По правилу Ле-Шателье давление должно задерживать  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение, поскольку этот процесс идет с увеличением объема [1]. Действительно, в [2] показано, что под воздействием всестороннего сжатия под давлением  $\sim 1$  GPa снижается температура начала мартенситного превращения, уменьшается эффект превращения аустенита в мартенсит. Высокое давление при всестороннем сжатии также уменьшает температуру и эффект обратного  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения [3]. В исходном состоянии парамагнитная сталь 05Г20С2 содержит малое, магнитометрически контролируемое количество  $\alpha$ -фазы, что позволяет магнитометрически контролировать фазовый состав стали при воздействии высокого давления до 45 GPa, развиваемого при ударно-волновом нагружении.

### Материал и методика исследования

Образцы стали 05Г20С2, закаленные от 950°C в масло, имели диаметр 10 mm и толщину 1 mm. Один из наиболее эффективных способов создания

в исследуемых образцах экстремальных плотностей энергии и высокого давления – использование химической энергии, выделяющейся при детонации конденсированных взрывчатых веществ за время порядка нескольких микросекунд. В рамках данной работы применялись взрывные метательные устройства (ВМУ) для создания в образце импульсных давлений до  $\sim 45$  GPa с длительностью  $\sim 1$   $\mu$ s посредством удара металлических пластин, разогнанных продуктами детонации взрывчатого вещества. Данные устройства позволяют плоским образом метать дюралюминиевые пластины толщиной 4–10 mm и диаметром 90–100 mm со скоростью 1.13–3 km/s. Схематическое изображение и параметры ВМУ приведены на рис. 1. Данное устройство способствовало прохождению плоской ударной волны через образец с амплитудой, обеспечивающей указанное выше импульсное давление.

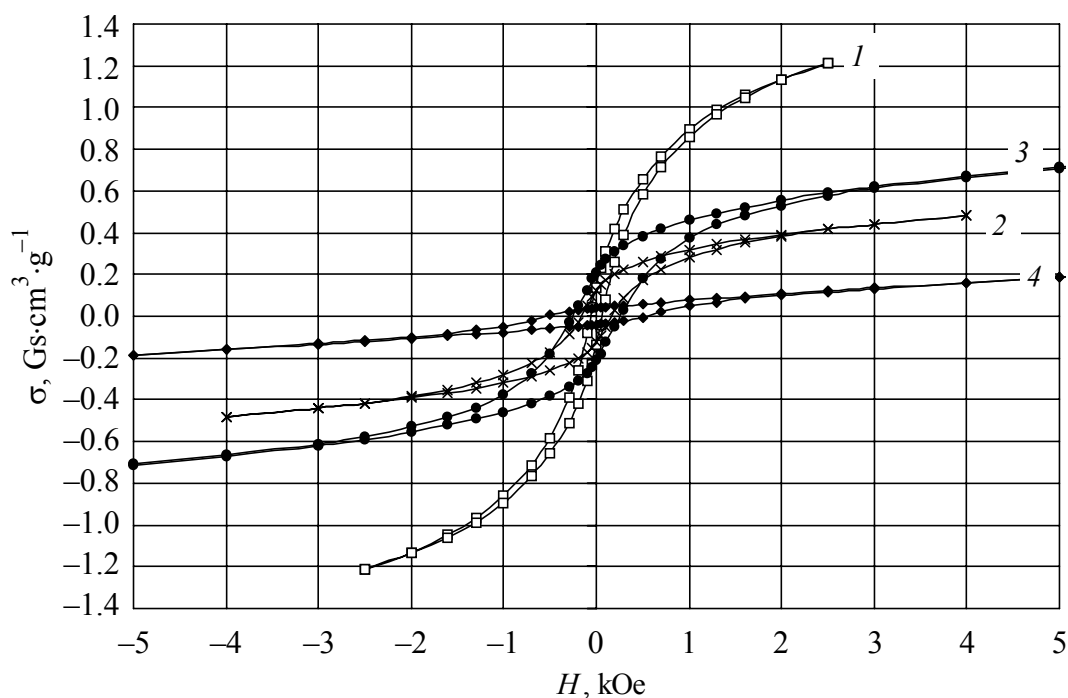


**Рис. 1.** Схема устройства для сохранения образца в сборе со взрывным метательным устройством: 1 – взрывная линза; 2 – ударник; 3 – фокусирующее кольцо; 4 – охранный элемент; 5 – ампула для сохранения образца; 6 – таблетка; 7 – медная пробка; 8 – исследуемый образец; 9 – охранный элемент

Для проведения магнитометрических исследований исходные образцы и подвергнутые ударно-волновому нагружению проходили электрохимическую полировку поверхности для удаления возможного загрязнения при обработке. Измерение магнитных свойств образцов осуществляли на магнитных весах Фарадея с автокомпенсацией.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На исходных закаленных образцах стали 05Г20С2 и образцах после ударно-волнового нагружения при комнатной температуре проведены измерения удельной намагниченности  $\sigma$  в зависимости от напряженности магнитного поля  $H$  (рис. 2). Видно, что в исходном состоянии образцы представляют собой парамагнетики с включением некоторой доли ферромагнитной фазы (кривая 1), о чем свидетельствует гистерезисная зависимость  $\sigma(H)$ . Следовательно, в исходном состоянии в парамагнитной стали присутствует некоторое количество  $\alpha$ -фазы ( $\sim 0.7\%$  по величине намагниченности). По коэрцитивной силе оценен размер кристаллитов  $\sim 300$  nm. Образцы, подвергнутые адиабатическому ударно-волновому сжатию до давления 45 GPa, также являются аустенитными с включением некоторой доли  $\alpha$ -фазы, поскольку



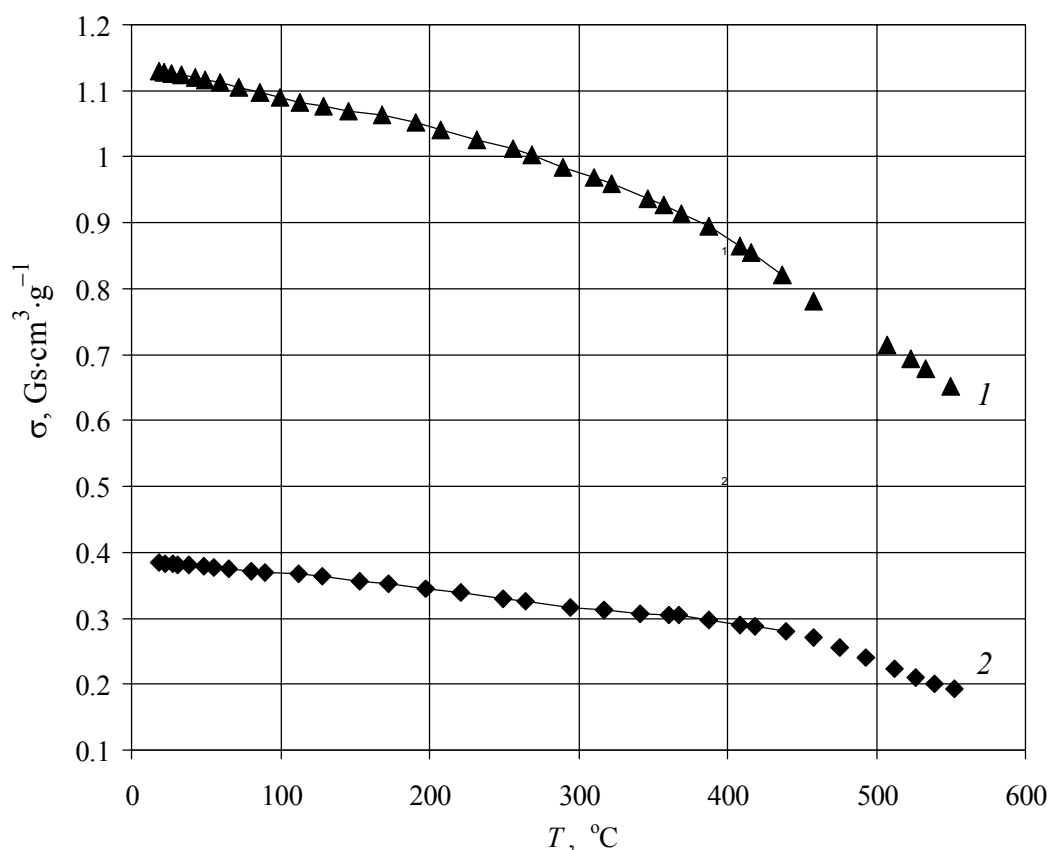
**Рис. 2.** Зависимость удельной намагниченности  $\sigma$  стали 05Г20С2 от напряженности магнитного поля  $H$  при комнатной температуре: 1 – исходный закаленный образец; 2 – образец после ударно-волнового нагружения  $P = 45$  ГПа; 3 – исходный образец после выдержки 15 min при  $T = 600^\circ\text{C}$ ; 4 – образец после ударно-волнового нагружения  $P = 45$  ГПа и выдержки 15 min при  $T = 600^\circ\text{C}$

сохраняется гистерезисная зависимость  $\sigma(H)$  (кривая 2). Однако видно, что удельная намагниченность в 3 раза меньше, чем в исходном образце, и соответствует содержанию 0.2%  $\alpha$ -фазы с размером кристаллитов  $\sim 150$  nm.

Нагрев исходных образцов до температуры  $600^\circ\text{C}$  с 15-минутной выдержкой при этой температуре приводит к двукратному понижению содержания  $\alpha$ -фазы (кривая 3). Аналогичный нагрев образцов, испытавших ударно-волновое воздействие, приводит практически к исчезновению  $\alpha$ -фазы (кривая 4).

Проведены исследования температурной зависимости удельной намагниченности исходных образцов и подвергнутых ударно-волновому воздействию со скоростью их нагрева  $2$  deg/min. На рис. 3 представлены зависимости  $\sigma(T)$  в поле  $H = 2$  kOe. Видно, что удельная намагниченность понижается с ростом температуры и при  $600^\circ\text{C}$  как исходные образцы, так и подвергнутые ударно-волновому воздействию полностью переходят в парамагнитное состояние. Таким образом, температура Кюри  $\alpha$ -фазы составляет  $600^\circ\text{C}$ , что типично для  $\alpha$ -мартенсита, и не изменяется после ударно-волнового воздействия.

В условиях адиабатического ударно-волнового сжатия до давления 45 ГПа возможные сдвиговые напряжения в образцах не приводят к образованию мартенсита деформации, поскольку не происходит увеличение намагниченности



**Рис. 3.** Зависимость удельной намагниченности  $\sigma$  стали 05Г20С2 в магнитном поле  $H = 2$  кОе от температуры: 1 – исходный закаленный образец; 2 – образец после ударно-волнового нагружения  $P = 45$  ГПа

образцов. Напротив, высокое давление и экстремальные плотности энергии, получаемые в ударной волне, не только подавляют образование мартенсита, но и приводят к уменьшению его доли в образцах. Это может быть обусловлено пиковым разогревом образцов, способствующим обратному  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращению, но в условиях высоких скоростей теплоотвода образца, заключенного в медную ампулу, наблюдается лишь частичное либо только в локальных областях  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение. Причем, как показано в [3], высокое давление значительно понижает температуру обратного  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения и его эффект. Поэтому наблюдается сохранение в образцах до 0.2%  $\alpha$ -фазы после ударно-волнового воздействия. Ранее в [4] нами наблюдалось в стабильных марганцевых аустенитных сталях, подвергнутых сдвигу под высоким давлением 8 ГПа, образование  $\alpha$ -мартенсита в локальных областях. Это объяснялось процессами расслоения, которые приводят к понижению содержания марганца в микрообластях, что переводит их в метастабильное состояние. В данном случае такие процессы, вероятно, не идут, поскольку это приводило бы к повышению удельной намагниченности образцов, испытавших ударно-волновое воздействие. Не происходит и изменение состава микрокристаллитов  $\alpha$ -фазы, поскольку сохраняется постоянная температура Кюри образцов.

Таким образом, образцы стали 05Г20С2, подвергнутые адиабатическому ударно-волновому сжатию импульсом давления 45 GPa длительностью 1  $\mu$ s, испытывают частичное обратное  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение, обусловленное экстремально высоким давлением.

1. *M. Cohen*, Acta metall. **1**, 85 (1953).
2. *А.И. Стрегулин, Л.А. Мельников*, ФММ **8**, 406 (1959).
3. *Л.А. Мельников, Б.К. Соколов, А.И. Стрегулин*, ФММ **15**, 357 (1963).
4. *А.И. Дерягин, Б.М. Эфрос, В.А. Завалишин, Л.В. Лоладзе, Н.Б. Эфрос, В.П. Пулюгин*, ФТВД **13**, № 3, 55 (2003).

*A.I. Deryagin, V.V. Milyavsky, B.M. Efros, V.A. Zavalishin, L.V. Loladze, N.B. Efros*

### INFLUENCE OF WAVE-IMPACT LOADING ON PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES OF STEEL 05Г20С2

Influence of wave-impact loading on 05Г20С2 steel samples has been investigated. It is shown that the samples subjected to the adiabatic wave-impact compression by pressure pulse of 45 GPa during 1  $\mu$ s experience partial reverse  $\alpha \rightarrow \gamma$  transformation due to extremely high pressure.

**Fig. 1.** Scheme of device for keeping sample as a unit with exploder-thrower unit: 1 – lens-exploder; 2 – striker; 3 – focusing ring; 4 – guard ring; 5 – ampoule for sample preservation; 6 – tablet; 7 – copper plug; 8 – investigated sample; 9 – guard plate

**Fig. 2.** Dependence of specific magnetization  $\sigma$  of steel 05Г20С2 on magnetic field strength  $H$  at room temperature: 1 – initial quenched sample; 2 – sample after wave-impact loading,  $P = 45$  GPa; 3 – initial sample after a 15 min holding,  $T = 600^\circ\text{C}$ ; 4 – sample after wave-impact loading,  $P = 45$  GPa and a 15 min holding,  $T = 600^\circ\text{C}$

**Fig. 3.** Temperature dependence of specific magnetization  $\sigma$  of steel 05Г20С2 in magnetic field  $H = 2$  kOe: 1 – initial quenched sample; 2 – sample after wave-impact loading,  $P = 45$  GPa