

- 25 Harris P., Presles H-N. The shock induced electrical polarization of water. J. Chem. Phys. 1982. V.77. №10. P.5157-5164.
- 26 Якушев В.В., Дремин А.Н., Набатов С.С., Шунин В.М. Физические свойства и превращения нитробензола при динамических давлениях до 30 ГПа. ФГВ. 1979. Т15. N12. С.132-139.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (3D ПРИНТЕР), МЕТОДОМ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ГОПКИНСОНА

*А.Ю. Гармашев, С.М. Долгих, Е.Б. Смирнов, Е.А. Петухов, А.И. Клёнов,
К.С. Сидоров, М.А. Шестириков, Д.Т. Юсупов, З.И. Завьялов, А.А. Борцов*

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия

Исследование физических и механических свойств материалов, подвергаемых воздействию интенсивных динамических нагрузок и высокоскоростной деформации, представляет собой большой научный и практический интерес в связи с развитием ряда областей новой техники, а также в связи с разработкой и внедрением в промышленность новых перспективных технологических приемов обработки материалов.

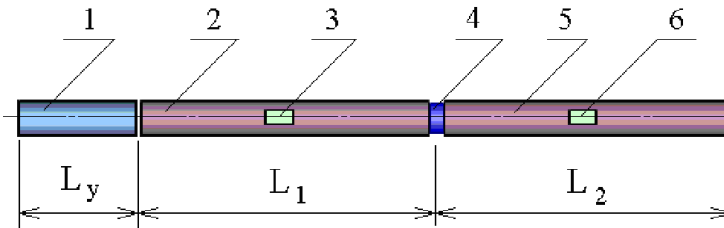
В настоящее время одним из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства являются аддитивные технологии. Аддитивные технологии (часто именуемые 3D-технологиями) обобщенное название технологий, предполагают изготовление (построение) физического объекта (детали) методом послойного нанесения (добавления, англ. – «add») материала по данным цифровой модели (или САД-модели), в отличие от традиционных методов формирования детали за счет удаления материала из массива заготовки [1].

В практике динамических испытаний механических свойств конструкционных материалов наибольшее распространение получили такие методы и установки, как кулачковые пластометры, копровые испытания, метод динамической осадки, задача кольца с помощью электромагнитного поля или взрыва. Значительный прогресс в области динамических испытаний был достигнут в последние десятилетия благодаря методу Кольского с использованием составного стержня Гопкинсона.

Эта методика позволяет проводить испытания широкого круга материалов, исследовать динамические диаграммы сжатия и растяжения в диапазоне скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$ [2].

Система для исследований состоит из двух длинных мерных стержней (нагружающего и опорного) с достаточно высоким пределом текучести и тонкого образца в виде таблетки, расположенного между их торцами. В нагружающем стержне возбуждается упругий импульс сжатия определенной амплитуды и длительности. При подходе к образцу этот импульс, ввиду разности акустических жесткостей материалов стержня и образца, разделяется: часть импульса отражается от границы обратно в нагружающий стержень, а другая часть проходит через образец в опорный стержень. Деформации стержней измеряются тензодатчиками, наклеенными на нагружающий и опорный мерные стержни.

Схема установки приведена на рисунке 1.



1 – ударник, 2 – нагружающий стержень, 3 и 6 – тензодатчики,
 4 – образец, 5 – опорный стержень

Рисунок 1. Схема установки ССГ

При выводе основных соотношений метода ССГ предполагается, что ввиду очень малой длины образца по сравнению с длиной нагружающего импульса в образце в течение испытания реализуется одноосное напряженное состояние с равномерным распределением напряжений и деформаций по его длине. Таким образом, несмотря на высокие скорости деформации образца (до $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$), испытание может рассматриваться как квазистатическое.

Параметрические зависимости $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$, $\dot{\varepsilon}(t)$ в образце определяются на основе экспериментальных записей упругой деформации в нагружающей $\varepsilon_I(t)$ и проходящей $\varepsilon_T(t)$ волнах напряжения (соответственно, в нагружающем и опорном стержнях) по следующим формулам [3]:

$$\sigma(t) = \frac{ES}{S_s^0} [\varepsilon_T(t)]; \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2C}{L_0} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)] \cdot dt; \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C}{L_0} (\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)), \quad (3)$$

где S_s^0 – исходная площадь поперечного сечения образца, S – площадь поперечного сечения мерных стержней, E – модуль упругости материала мерных стержней, C – скорость продольных волн в стержнях, L_0 – первоначальная длина образца.

Из полученных параметрических зависимостей исключается время и строится диаграмма деформирования σ - ε конкретного образца и зависимости скорости деформации от деформации $\dot{\varepsilon} \sim \varepsilon$.

С помощью установки можно исследовать диаграммы сжатия, растяжения, локализованный сдвиг, трещиностойкость, эффект Баушингера и другие характеристики материалов при скоростях деформации $\dot{\varepsilon} \sim 10^2$ - 10^4 с^{-1} . Смена вида испытаний в установках стержней Гопкинсона достигается достаточно просто. Для этого требуется применить другие типы образцов и стержни с измененной геометрией в месте крепления образца. Нагружение и способ регистрации упругих деформаций стержней остаются такими же.

Измерение упругих импульсов деформаций в мерных стержнях проводится с помощью наклеенных на их боковые поверхности тензорезисторов. Регистрируются нагружающий $\varepsilon^I(t)$, отраженный $\varepsilon^R(t)$ и прошедший $\varepsilon^T(t)$ через образец импульсы деформации, являющиеся "откликами" материала на приложенную нагрузку. Тензорезисторы (см. рисунок 1) наклеиваются на образующую поверхность на расстоянии 4-5 диаметров от торца нагружения (нагружающий стержень) или от торца касания с образцом (нагружающий и опорный стержень).

Для питания тензорезисторов выбрана потенциометрическая схема ввиду её простоты и возможности питания нескольких измерительных каналов от одного источника. Обе группы (тензорезисторов на опорном и нагружающем стержнях) питаются постоянным током от стандартного стабилизированного блока питания через оригинальные схемы питания и калибровки. Сигналы с датчиков регистрируются запоминающим осциллографом.

Аддитивные технологии (от английского Additive Fabrication) – обобщенное название технологий, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели (или CAD-модели) методом послойного добавления материала.

В отличие от технологии механической обработки, работающей по принципу "вычитания", т.е. поэтапного удаления материала с заготовки до получения необходимых формы и размера, получение изделия происходит послойно, шаг за шагом путем формирования (тем или иным способом) слоя материала, отверждения или фиксации этого слоя в соответствии с конфигурацией сечения CAD-модели и соединения каждого последующего слоя с предыдущим.

Образцы из стали 12X18H10T были изготовлены методом лазерного спекания металлического порошка (Selective Laser Sintering (SLS)) на базе СФТИ НИЯУ «МИФИ» на промышленном 3-D принтере.

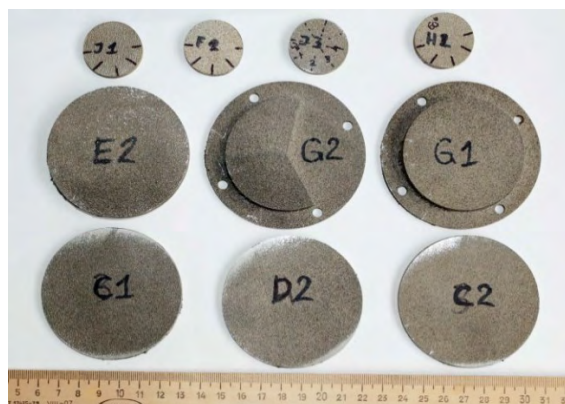


Рисунок 2. Образцы из стали изготовленные на 3D принтере

В таблице 1 приведены результаты определения химического состава материала образцов

Таблица 1. Химический состав образцов

Образец	Массовая доля элемента, %				
	Cr	Ni	Ti	Mn	Si
Образец 1	17,2	10,5	0,55	0,61	0,63
Образец 2	17,4	10,0	0,56	0,58	0,66
Образец 3	17,3	10,7	0,56	0,60	0,72
12X18H10T ГОСТ	17,0- 19,0	11,0- 13,0	5 x C- 0,80	≤2,00	≤0,80

По содержанию основных легирующих элементов материал исследуемых образцов условно можно отнести к нержавеющей стали типа X18H10T по ГОСТ5632-72 .

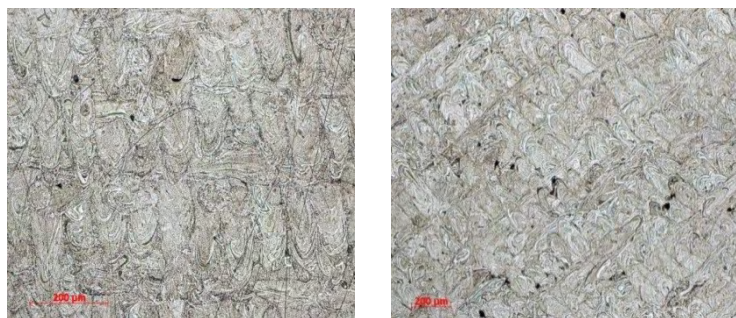


Рисунок 3. Структура материала АТ-нержавеющей стали, оптические снимки

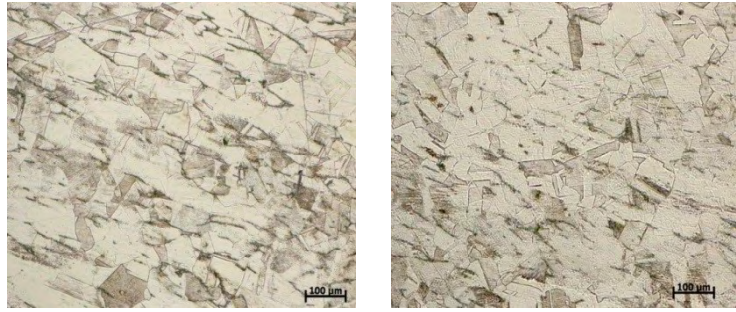


Рисунок 4. Структура материала традиционно изготовленной нержавеющей стали, оптические снимки

На рисунке 3 наблюдается упорядоченная структура, обусловленная, по-видимому, движением лазера, без чётко выраженных границ зёрен, что может свидетельствовать о процессе быстрой кристаллизации. По этой же причине зерно имеет меньшие размеры, чем в 12Х18Н10Т (на рисунке 4).

В ходе исследований проведена серия экспериментов с образцами АТ из нержавеющей стали Ø8x4 мм. Скорость ударника составила 7,24-13,88 м/с, собственные скорости деформации образцов варьируются в пределах: $0,75 \times 10^3$ до $2,8 \times 10^3$ 1/с.

На рисунках 5, 6 приведены семейства диаграмм динамического нагружения образцов, полученные при различных скоростях ударника. На диаграммах сплошными линиями обозначены зависимости «напряжение-деформация», а пунктирными линиями – «скорость деформации-деформация». Цифрами на диаграммах показаны номера образцов.

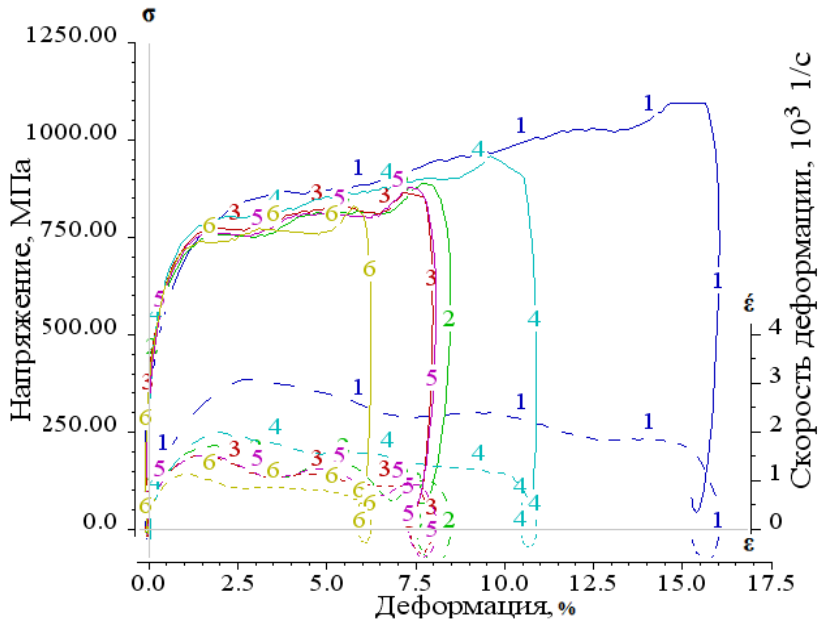


Рисунок 5. Семейство диаграмм «σ - ε» первой серии опытов

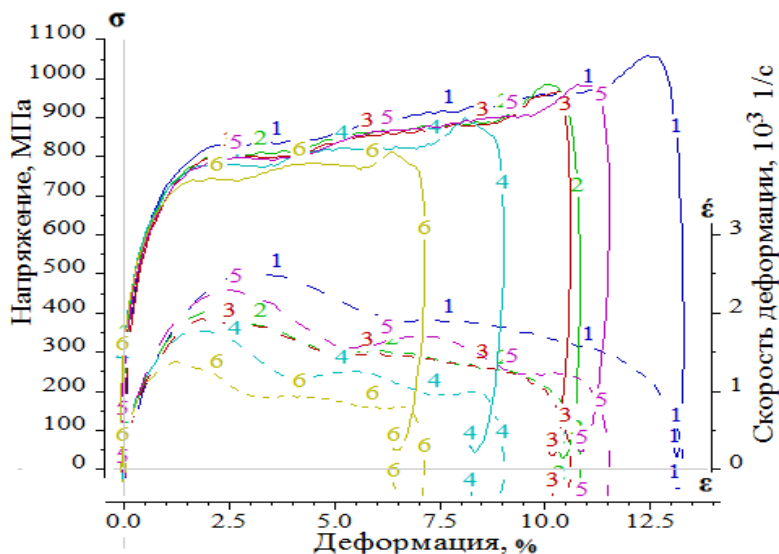
Рисунок 6. Семейство диаграмм « $\sigma - \epsilon$ » второй серии опытов

Таблица 2. Деформация и размеры образцов первого комплекта

№ образца	Скорость ударника, м/с	Толщина, мм	Диаметр, мм	Деформация, %
1	13,88	2,99	7,91	15,70
2	8,47	2,99	7,91	7,40
3	9,25	2,98	7,92	6,70
4	10,86	2,98	7,91	10,40
5	9,09	2,97	7,90	6,40
6	8,06	2,98	7,91	5,00

Таблица 3. Деформация и размеры образцов второго комплекта

№ образца	Скорость ударника, м/с	Толщина, мм	Диаметр, мм	Деформация, %
1	11,90	2,91	7,92	12,70
2	10,63	2,91	7,90	10,00
3	10,41	2,91	7,90	9,60
4	9,25	2,91	7,90	6,90
5	10,86	2,92	7,91	10,30
6	8,33	2,92	7,90	5,10

Диаграммы зависимостей « $\sigma - \epsilon$ » не являются монотонно возрастающими. Такой вид диаграмм « $\sigma - \epsilon$ » является типичным для динамических диаграмм, полученных по методу Кольского.

Из рисунков 5, 6 видно, что при разных скоростях деформации диаграммы $\sigma - \epsilon$ мало отличаются друг от друга, обладая приблизительно одинаковым деформационным упрочнением. Показатели предела текучести, (таблица 4) $\sigma_{0,2}$ и предела прочности σ_b для образцов из АТ стали ~ 2 раза выше, чем для стали, изготовленной традиционным способом (по марочнику сталей [4]).

Таблица 4. Показатели предела текучести $\sigma_{0,2}$ и предела прочности σ_b

Сталь	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа
12Х18Н10Т ГОСТ	282,43	561,14
АТ нержавеющая сталь	552,15	938,6

В ходе исследований проведено 12 экспериментов с образцами из нержавеющей стали. Диапазон скоростей ударника от 7 до 14 м/с, при этом собственные скорости деформации образцов

– от $0,75 \times 10^3$ до $2,8 \times 10^3$ 1/с. В работе приведены диаграммы напряжение-деформация и скорость деформации-деформация.

Проведен сравнительный анализ результатов исследования образцов, изготовленных с помощью аддитивных технологий, с табличными данными стали, изготовленной традиционным способом.

Список литературы

1. Валетов В.А., Аддитивные технологии (состояние и перспективы). Учебное пособие – СПб., Университет ИТМО, 2015. – 58 с.
2. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения. Механика, 1950, выпуск 4, 128 с.
3. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. Динамика удара. М.: Мир, 1985, 296 с.
4. М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский и др. Марочник сталей и сплавов., под общей ред. А.С. Зубченко – М., Машиностроение, 2001. – 672 с.

INVESTIGATING HIGH-RATE DEFORMATION OF STAINLESS STEEL MADE BY ADDITIVE FABRICATION (3D PRINTER) USING SPLIT HOPKINSON PRESSURE BARS TECHNIQUE

*A.Yu. Garmashev, S.M. Dolgikh, E.B. Smirnov, E.A. Petukhov, A.I. Klionov,
K.S. Sidorov, M.A. Shistirikov, D.T. Yusupov, Z.I. Zavialov, A.A. Bortsov*

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

Investigation of mechanical and physical properties of materials exposed to intensive impact loading and high-rate deformation is of great scientific and practical interest owing to development of a number of new branches of technology, and due to development and industrial introduction of new advanced material processing approaches.

Additive fabrication is currently considered as one of the fastest growing lines of “digital” production. “Additive fabrication” (often named as 3D-technologies) indicates a general name for technologies implying that a physical object (a workpiece) is built by layer-upon-layer deposition (“adding”) of some material from digital model (CAD-model) engineering data, as opposed to conventional techniques of workpiece formation at the cost of material subtraction out of the blank array [1].

Such techniques and facilities as cam plastometers, drop-weight tests, dynamic deposition method, ring deposition driven by electromagnetic field or pulse have become very popular in practice of impact testing of the structural materials mechanic properties. Dramatic progress in impact testing was achieved in the past decades by the application of the split Hopkinson pressure bar system by Kolsky.

This technique allows a wide range of materials to be tested and stress-strain dynamic curves to be studied within the strain rate range of $\dot{\epsilon} = 10^2$ - 10^4 sec⁻¹ [2].

A research facility comprises two long measuring bars (incident and transmitter ones) with rather high yield point and a thin pelletized specimen inbetween their angles. The elastic compression impulse of specified amplitude and duration is excited in the incident bar. Going toward the specimen this impulse, owing to the acoustic stiffness difference of the bar and specimen materials, is divided: one part of the impulse reflects from the boundary back into the incident bar, while another part passes through the specimen into the transmitter bar. Bar strains are measured with strain gauges bonded onto the incident and transmitter measuring bars.

Installation diagram is presented in Figure 1.