

# 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**

В настоящей работе приведены результаты исследований динамических свойств конструкционного материала – нержавеющей стали, полученной по аддитивной технологии, методом 3D-печати. Исследования проведены с помощью установки метода составных стержней Гопкинсона. Этот метод позволяет проводить испытания широкого круга материалов, исследовать динамические диаграммы сжатия и растяжения в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\epsilon} = 10^2 - 10^3 \text{ с}^{-1}$ .

Образцы из нержавеющей стали (аналог 12X18H10T) были изготовлены методом лазерного спекания металлического порошка (Selective Laser Sintering) на промышленном 3-D принтере.

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.

Цель работы: исследование свойств образцов, изготовленных по методу аддитивных технологий.

Задачи: проведение серии экспериментов с помощью установки метода составных стержней Гопкинсона.

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 CAD-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, раздача 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  $\dot{\epsilon} = 10^2 - 10^4$  с<sup>-1</sup> [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.

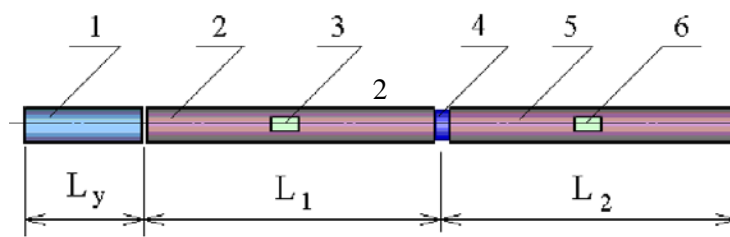


Рисунок 1 – Схема установки ССГ.

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

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]:

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

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

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

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  $\sigma$ - $\varepsilon$  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  $\dot{\varepsilon} \sim 10^2$ - $10^4 \text{ с}^{-1}$ . 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 5632-72	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 .

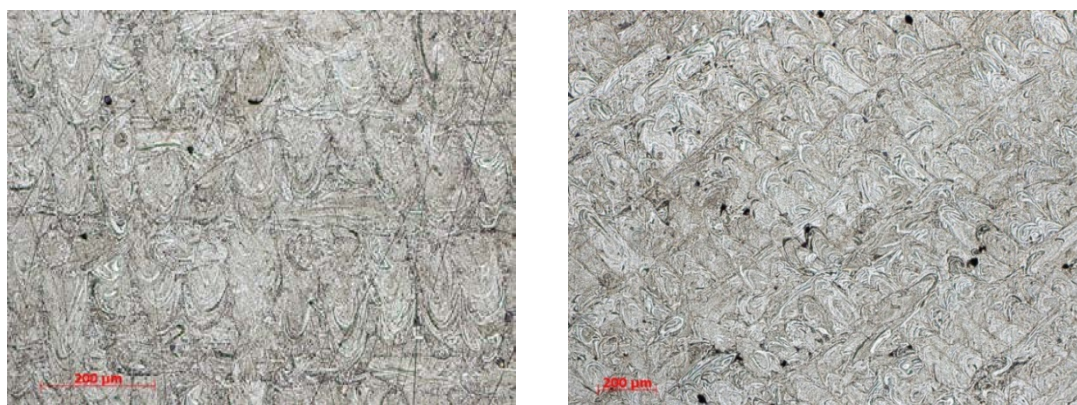


Рисунок 3 – Структура материала АТ-нержавеющей стали, оптические снимки.

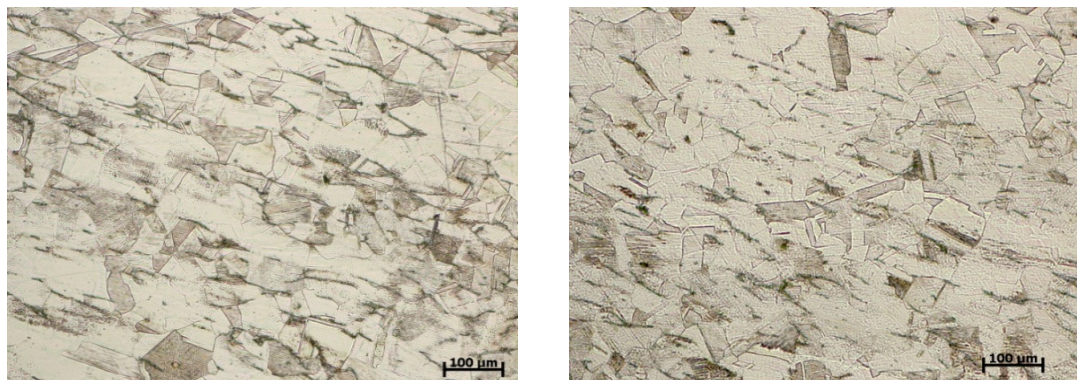


Рисунок 4 – Структура материала традиционно изготовленной нержавеющей стали, оптические снимки.

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 12X18H10T, также видны поры большего размера (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.

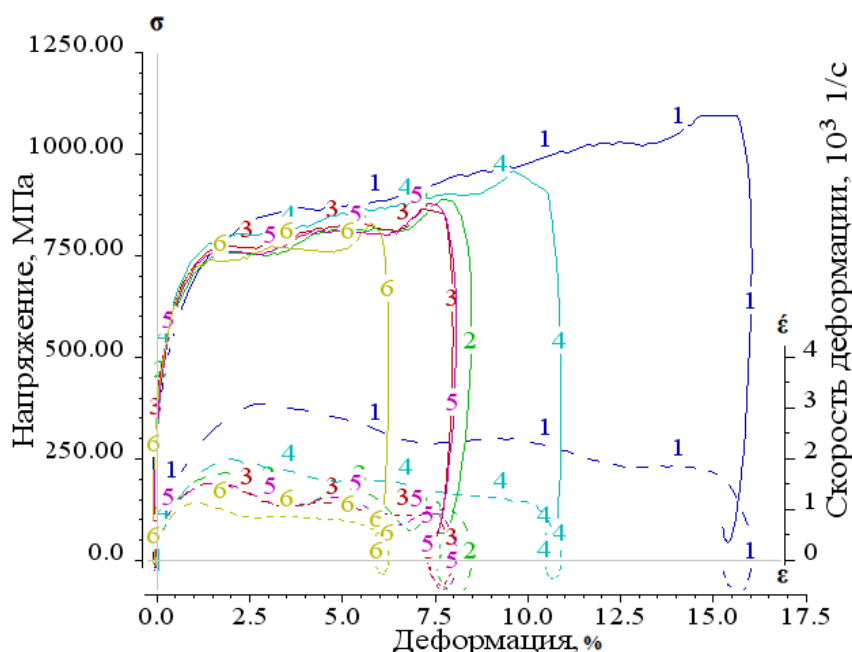


Рисунок 5 – Семейство диаграмм « $\sigma$  -  $\epsilon$ » первой серии опытов.

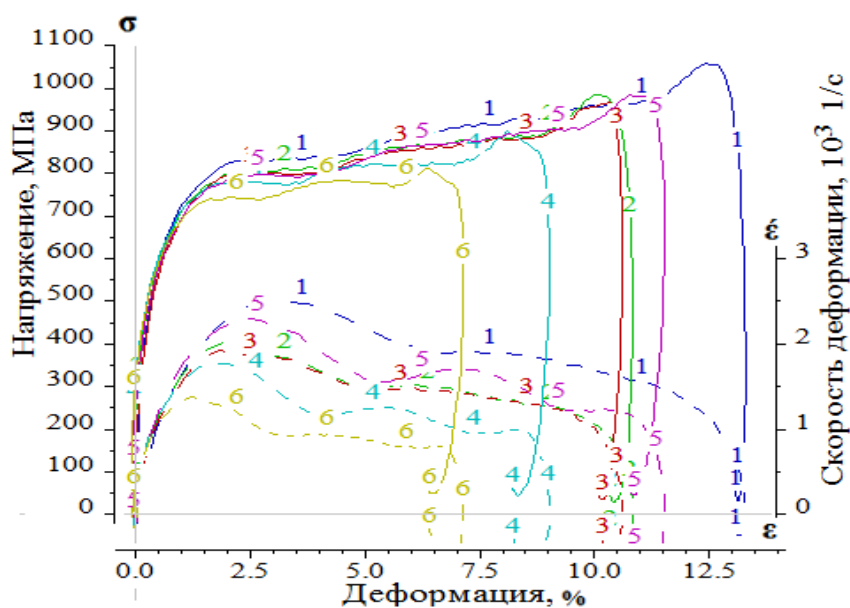


Рисунок 6 – Семейство диаграмм « $\sigma$  -  $\epsilon$ » второй серии опытов.

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  $\sigma_B$  для образцов из АТ стали ~ в 2 раза выше, чем для стали, изготовленной традиционным способом (по марочнику сталей [4]).

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

Сталь	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , 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. – 63 с.
2. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения. Механика, 1950, выпуск 4, с. 108-128.
3. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. Динамика удара. М.: Мир, 1985, с. 296.
4. Марочник сталей и сплавов / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский и др., Под общей ред. А.С. Зубченко – М., Машиностроение, 2001. – 672 с.