

УДК 539.4

ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

А. М. Подурец^{1,2}, И. В. Пикулин¹, В. Г. Симаков¹, Т. О. Скляднева¹,
И. А. Терешкина^{1,2}, М. И. Ткаченко^{1,2}, И. Р. Трунин^{1,2},
Е. Е. Шестаков¹, И. С. Гнотов¹

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

²Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 607186 Саров

Приведены результаты цикла исследований по определению динамических прочностных характеристик образцов, изготовленных по технологии селективного лазерного плавления порошков на основе стали 12Х18Н10Т, и их сравнение со свойствами стали 12Х18Н10Т, полученной по традиционной технологии горячекатаного проката, при ударно-волновом нагружении в диапазоне давлений сжатия 3–7 ГПа. Показано, что образцы из стали, изготовленные по технологии селективного лазерного плавления, имеют большую сопротивляемость кратковременному растяжению, возникающему в результате взаимодействия встречных волн разгрузки, по сравнению с горячекатаной сталью 12Х18Н10Т.

Ключевые слова: сталь 12Х18Н10Т, селективное лазерное плавление, откольное разрушение, поврежденность, металлографический анализ.

DOI 10.15372/FGV2023.9391
EDN RKJMQT

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы интенсивно развиваются аддитивные технологии — производство объектов путем послойного наращивания материала [1, 2]. Детали, изготовленные по таким технологиям, широко используются в различных областях промышленности, строительстве, медицине и т. д. Одним из направлений аддитивных технологий, имеющим большое практическое применение, является технология селективного лазерного плавления (СЛП) металлических порошков [3–6], которая заключается в расплавлении тонкого слоя металлического порошка лазером высокой мощности. Эта технология позволяет проводить построение сложных неразборных изделий с внутренними полостями и каналами с высокой точностью и повторяемостью, что и отличает технологию СЛП от традиционных методов изготовления деталей.

Технологический процесс СЛП включает в себя построение подробной 3D-модели изделия, выбор оптимальных параметров исполь-

зумой установки для выращивания изделий из различных порошков и определение свойств новых, полученных по технологии СЛП материалов, удовлетворяющих эксплуатационным требованиям изделия.

Целью настоящей работы было определение динамических прочностных характеристик аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, изготовленной по технологии СЛП (далее по тексту СЛП-сталь), и сравнение их со свойствами стали 12Х18Н10Т, полученной по традиционной технологии горячей прокатки (далее по тексту традиционная сталь). Исследования проводили с применением современных лабораторных комплексов высокоскоростных ударных воздействий, методик регистрации волновых процессов и комплекса металлографических исследований.

Отметим, что большинство представленных в открытой литературе экспериментальных исследований различных материалов, изготовленных по технологии СЛП, проведено в области скоростей деформации до $\dot{\epsilon} \approx 10^4 \text{ с}^{-1}$ [7–12].

Особый интерес представляют данные о деформационных и прочностных свойствах материалов при высокоскоростных ударных на-

грузках ($\dot{\varepsilon} \approx 10^5 \div 10^6 \text{ с}^{-1}$), поскольку в этой области нагружений результаты ограничены единичными экспериментами на небольшом количестве материалов СЛП [13–18]. Эти данные также используются при разработке конструкций, работающих в экстремальных условиях эксплуатации.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

В качестве исходного материала для изготовления опытных образцов выбрали порошок на основе сплава 12X18H10T производства ООО «Сфера М» (г. Озерск) со средним размером частиц $\approx 40 \text{ мкм}$. Определение гранулометрического, химического и фазового составов и других параметров исходной металлопорошковой композиции, а также изготовление исходных образцов по технологии СЛП выполнены в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Выращивание образцов методом селективного лазерного плавления проводили на установке MeltMaster^{3D}-250 (изготовитель НПО «ЦНИИТМАШ», Россия). Она оборудована двумя иттербийевыми волоконными лазерами Nd:YAG Laser с максимальной выходной мощностью 400 Вт и длиной волны $1075 \pm 2 \text{ нм}$. Рабочий объем «строительной камеры» составляет $250 \times 250 \times 250 \text{ мм}$.

Опытные образцы были изготовлены при следующих параметрах печати: мощность лазера — 210 Вт, диаметр лазерного пятна на поверхности порошка $\approx 50 \text{ мкм}$. Образцы изготавливали в камере в защитной среде азота, скорость сканирования — 600 мм/с, шаг сканирования — 60 мкм, толщина слоя наносимого порошка — 40 мкм. Применили линейную стратегию сканирования лазерным лучом — «зиг-заг».

На установке MeltMaster^{3D}-250 были изготовлены заготовки в форме цилиндров высотой до 100 мм и диаметром до 12 мм. Из этих цилиндров далее вырезали образцы в виде дисков диаметром $\approx 10 \text{ мм}$ и толщиной $\approx 4 \text{ мм}$.

На рис. 1 представлены фрагменты микроструктуры срезов образцов-дисков.

Сталь, изготовленная методом СЛП, состоит из отдельных чешуек неправильной либо стобобразной формы (см. рис. 1, б). Такая структура является отражением технологии изготовления материала, при которой происходит полное расплавление исходного порошка и охлаждение расплава с большой скоростью

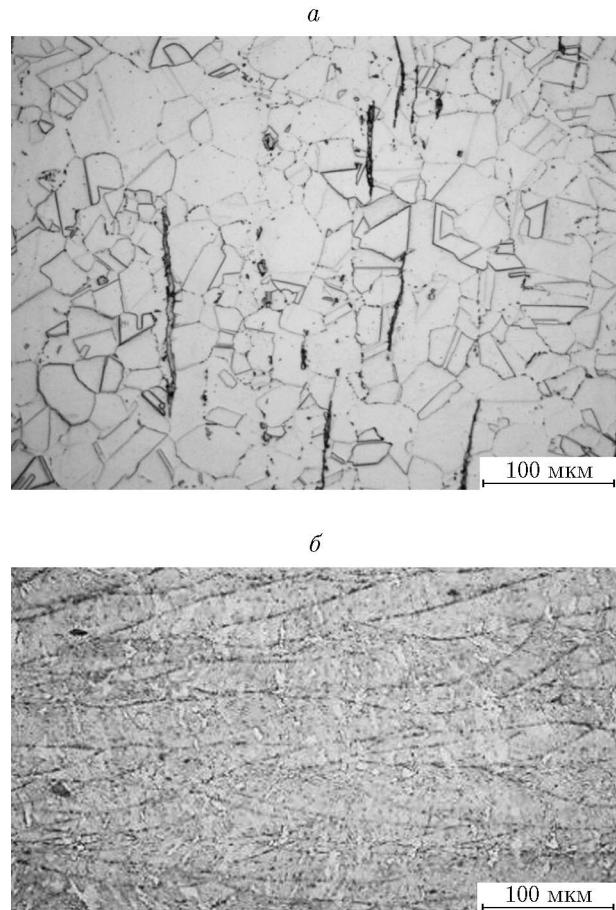


Рис. 1. Внутренняя структура образцов (увеличение $\times 200$) из традиционной стали 12X18H10T (а) и СЛП-стали 12X18H10T (б)

(до 10^6 К/с). Характерные размеры чешуек — $(100 \div 150) \times (30 \div 50) \text{ мкм}$.

Перед испытаниями образцов проводили измерения их плотности и твердости. Твердость образцов, изготовленных по технологии СЛП, составила HV 260, а для стали, изготовленной по традиционной технологии, — HV 152. Плотность СЛП-стали, определенная методом гидростатического взвешивания, составила $\rho_0 = 7.87 \div 7.89 \text{ г/см}^3$, плотность традиционной стали — 7.89 г/см^3 .

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследования поведения образцов из СЛП-стали проводили по следующей схеме: плоский ударник, разогнанный в стволе нагружающей пневматической установки пушечного типа, соударялся с мишленным блоком, на котором была закреплена обойма с двумя встроенными в нее

образцами. Такая постановка экспериментов с плоскими ударными волнами привлекает внимание условиями, характеризуемыми одномерной деформацией, и большим диапазоном достигаемых напряжений. Нагружение мишленного блока с образцами осуществляли ударником из традиционной стали 12Х18Н10Т толщиной 2 мм и диаметром 45 мм со скоростями до 350 м/с. Выбор диапазона скоростей нагружения определяли возможностью рассмотрения многостадийности процесса откольного разрушения — от стадии зарождения дефектов до полного разделения образца на части.

В мишленную обойму помещали образцы диаметром 10 мм и толщиной 4 мм из традиционной стали 12Х18Н10Т и из СЛП-стали.

С использованием методики непрерывной доплеровской диагностики на основе многоканальной оптической схемы PDV [19] регистрировали подлетную скорость ударника к мишени $W_{уд}$ и скорость движения свободных поверхностей образцов $W(t)$. Согласно методике по соотношению сигнал — шум 30 дБ средняя погрешность определения скорости составляет 2.5 м/с, времени — 5 нс. После каждого опыта сохраненные образцы разрезали, проводили металлографический анализ шлифов их попечечных срезов и определяли степень их разрушения.

Анализ поврежденности образцов выполняли с помощью пакета компьютерных программ Vestra Imaging System (ООО «Митела», г. Москва). Для количественной оценки поврежденности ω в постопытных образцах использовали планиметрический метод, основанный на измерении суммарной площади сечений дефектов на определенной площади металлографического шлифа и построении гистограммы распределения поврежденности по толщине шлифа $\omega(x)$, которую аппроксимировали кривой Гаусса [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Характерные экспериментальные спектрограммы, полученные в опыте со скоростью нагружения $W_{уд} = 273$ м/с, приведены на рис. 2. Зависимости скорости движения свободных поверхностей образцов, полученные после обработки спектрограмм, изображения по перечным сечениям сохранных образцов и гистограммы распределения поврежденности ω по толщине образца x с построенными по ним

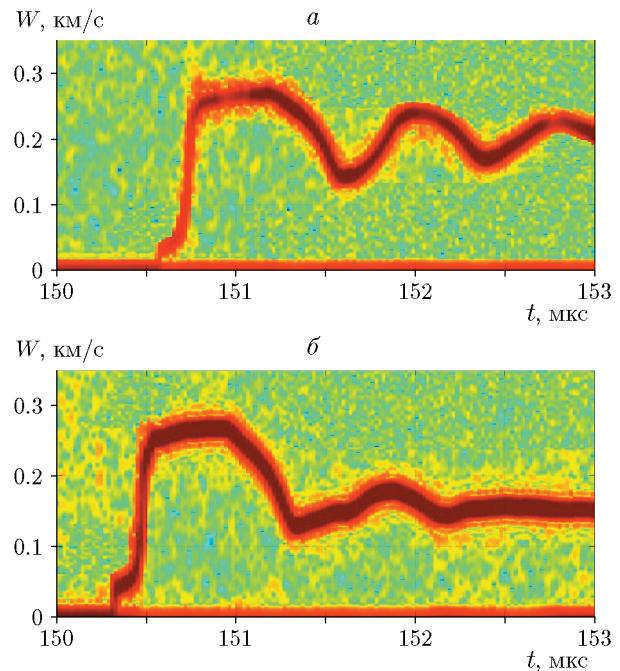


Рис. 2. Экспериментальные спектрограммы ($W_{уд} = 273$ м/с)

аппроксимациями кривыми Гаусса приведены на рис. 3, 4.

Как следует из полученных результатов, при $W_{уд} = 203$ и 238 м/с в СЛП-стали не образуется поврежденность, способная сформировать «откольный» сигнал (см. рис. 3, а), в отличие от образца из традиционной стали (см. рис. 4, а), поэтому на профилях $W(t)$ в образцах из СЛП-стали (рис. 3, а, зависимости 1, 2) не регистрируется выход ударной волны на свободную поверхность, которая образуется в зоне откольной поврежденности. При скоростях удара $W_{уд} = 273$ и 295 м/с в СЛП-стали поврежденность становится более выраженной и соответствует стадии слияния (столкновений) трещин в одну магистральную трещину. Возможно поэтому на зависимостях $W(t)$ в образцах из СЛП-стали регистрируется затянутый характер откольного импульса — плавное нарастание скорости после прихода ударной волны, образованной в зоне откола, на свободную поверхность образца. Для образцов из традиционной стали при таких скоростях нагружения уже образовались магистральные трещины.

При скорости соударения 350 м/с все образцы разрушились на две части (на рис. 3, е, 4, е показаны верхние части сохранных

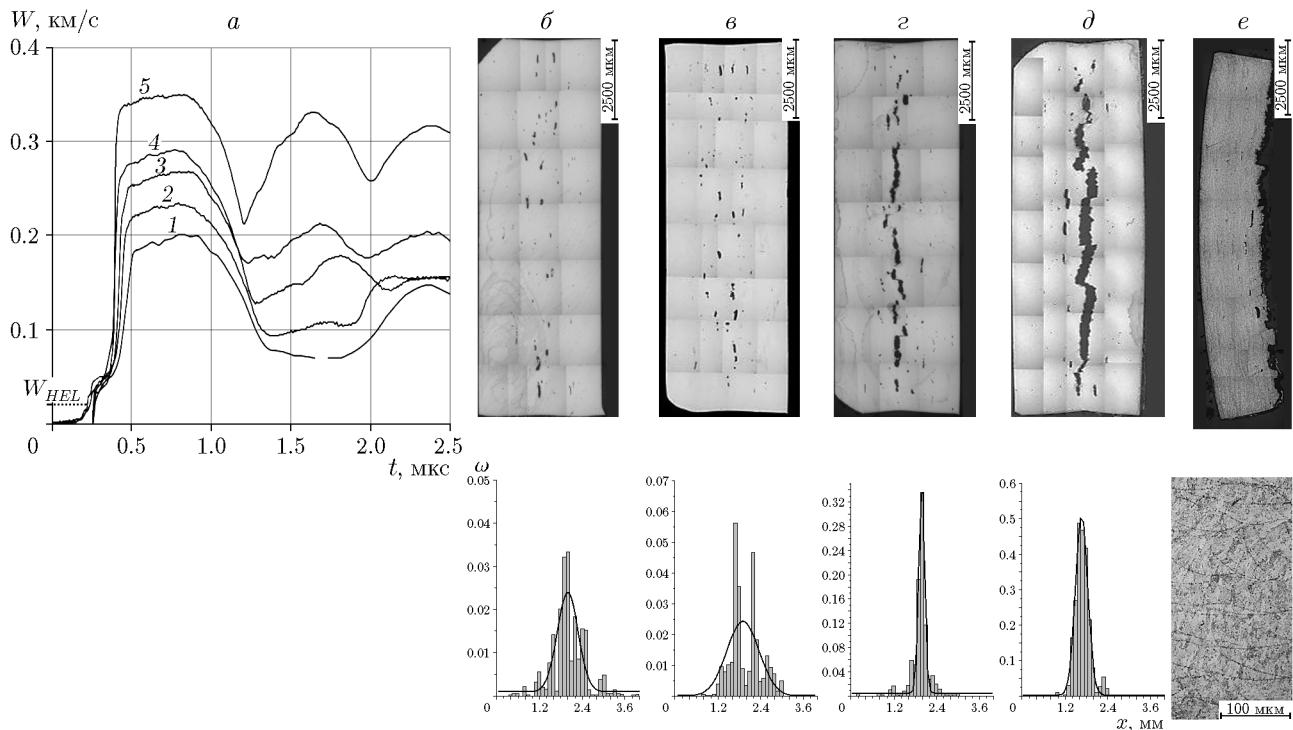


Рис. 3. Зависимость скорости движения свободной поверхности образцов из СЛП-стали 12Х18Н10Т (а, $W_{уд} = 203$ (1), 238 (2), 273 (3), 295 (4), 350 м/c (5)), поперечные сечения сохранных образцов (увеличение $\times 50$) и гистограммы распределения поврежденности с аппроксимирующими кривыми Гаусса ($W_{уд} = 203$ (б), 238 (в), 273 (г), 295 (д), 350 м/c (е))

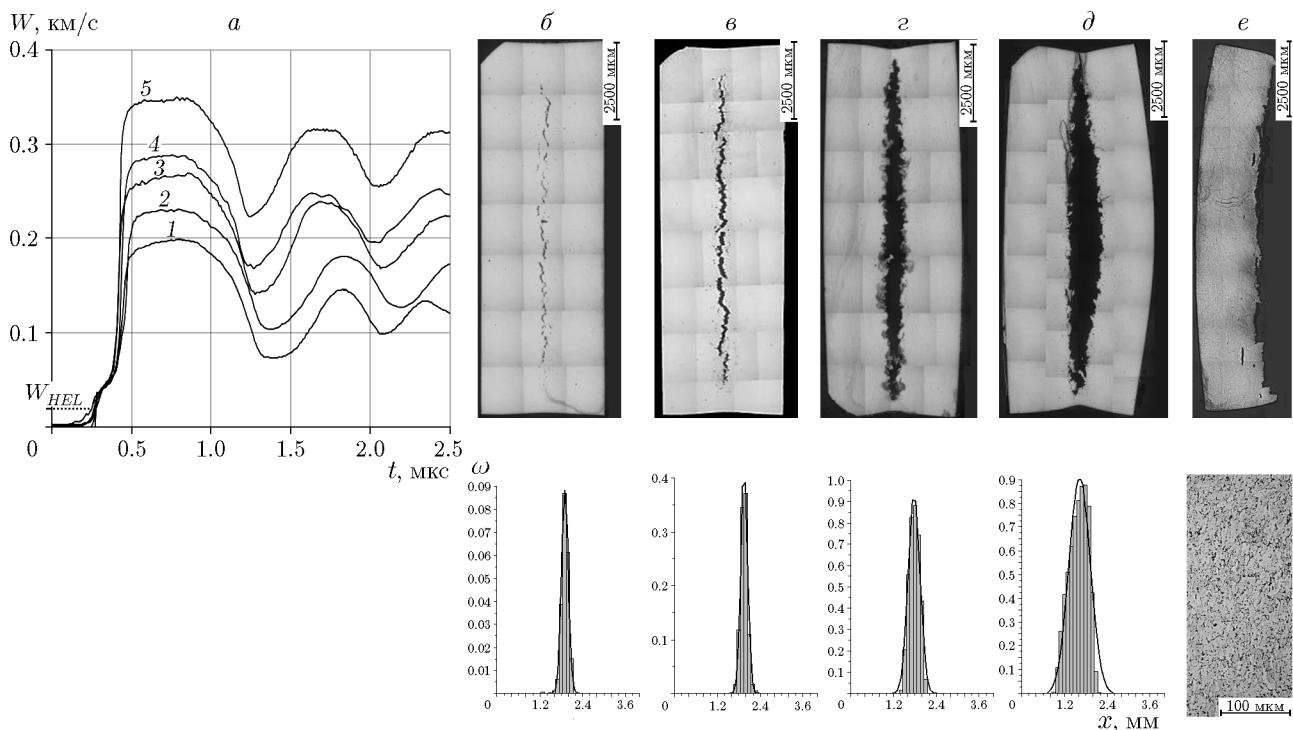


Рис. 4. Зависимость скорости движения свободной поверхности образцов из традиционной стали 12Х18Н10Т (а, $W_{уд} = 203$ (1), 238 (2), 273 (3), 295 (4), 350 м/c (5)), поперечные сечения сохранных образцов (увеличение $\times 50$) и гистограммы распределения поврежденности с аппроксимирующими кривыми Гаусса ($W_{уд} = 203$ (б), 238 (в), 273 (г), 295 (д), 350 м/c (е))

ных образцов), структура фрагментов неразрушенной части образцов соответствует исходной структуре, а профили $W(t)$ передают все особенности волновых течений в образцах при полном откольном разрушении.

Металлографический анализ сохраненных в опытах образцов подтвердил многостадийный характер откольного разрушения и меньшую степень поврежденности образцов из СЛП-стали, по сравнению с образцами из традиционной стали, при одинаковых условиях действия растягивающих волн.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На всех профилях $W(t)$ наблюдается двухволновая структура фронта ударной волны, связанная с разделением его на упругий предвестник, который распространяется со скоростью, соответствующей продольной скорости звука C_L , и пластическую волну, догоняющую предвестник со скоростью ударной волны D . Согласно полученным результатам амплитуды упругого предвестника W_{HEL} для СЛП-стали и традиционной стали 12Х18Н10Т совпадают (см. рис. 3,а, 4,а) и примерно равны 40 м/с. Значения динамического предела упругости $\sigma_{HEL} = \rho_0 C_L W_{HEL}/2$ и динамического предела текучести $Y_d = (1 - 2\nu)\sigma_{HEL}/(1 - \nu)$, где ν — коэффициент Пуассона, составили $\sigma_{HEL} \approx 0.9$ ГПа, $Y_d \approx 0.5$ ГПа. Продольная скорость звука в обоих материалах $C_L = 5.74$ км/с, $\nu = 0.28$ [21].

Отметим здесь, что при скоростях деформации $\dot{\varepsilon} \approx 10^4$ с⁻¹, которые достигаются в экспериментах по методу Кольского — Гопкинсона, динамические свойства (предел текучести $\sigma_{0.2}$ и предел прочности σ_b) СЛП-стали 12Х18Н10Т [7] примерно в два раза выше, чем у традиционной стали 12Х18Н10Т.

По результатам обработки поперечных срезов образцов были сделаны оценки общей поврежденности образца ω (площадь под кривой Гаусса), ширины зоны образца Δ , где есть дефекты, и координаты сечения образца x_c , где поврежденность достигает максимального значения (см. таблицу).

Как следует из таблицы и рис. 5, общая поврежденность ω стали 12Х18Н10Т, изготовленной традиционным способом, превышает аналогичные значения для стали, изготовленной по технологии селективного лазерного плавления. При скорости соударения $W_{уд} = 273$ м/с

Результаты измерения откольной поврежденности стали 12Х18Н10Т, изготовленной по разным технологиям

№ п/п	Тип образца	$W_{уд}$, м/с	ω	Δ , мм	x_c , мм
1	Традиционная сталь	203	0.02	0.39	2.1
	СЛП-сталь		0.016	1.14	2.0
2	Традиционная сталь	238	0.097	0.38	2.05
	СЛП-сталь		0.027	1.78	2.1
3	Традиционная сталь	273	0.388	0.66	2.2
	СЛП-сталь		0.068	0.32	2.0
4	Традиционная сталь	295	0.69	1.2	2.3
	СЛП-сталь		0.21	0.68	2.1

в образце из традиционной стали образуется раскрытая магистральная трещина шириной $\Delta \approx 0.66$ мм, а в образце из СЛП-стали — отдельные дефекты, выстроенные в линию ($\Delta \approx 0.32$ мм), и общая поврежденность ω у традиционной стали примерно в шесть раз больше. Отметим, что координата сечения образца, где достигается максимум поврежденности, для всех материалов ≈ 2.1 мм. При ско-

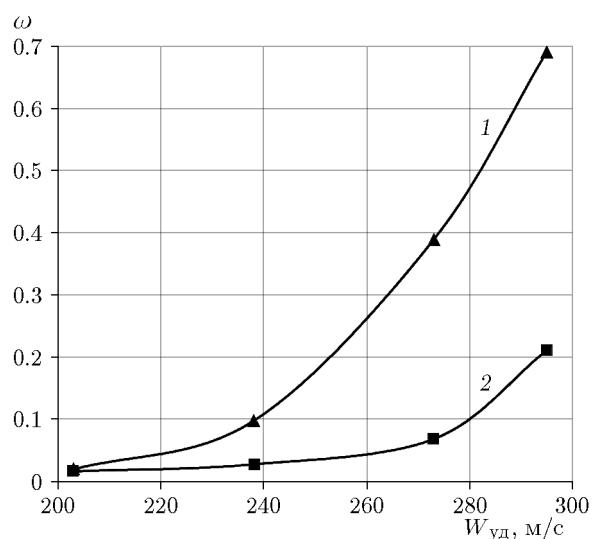


Рис. 5. Зависимость поврежденности от скорости соударения образцов из традиционной стали 12Х18Н10Т (кривая 1) и из СЛП-стали 12Х18Н10Т (кривая 2)

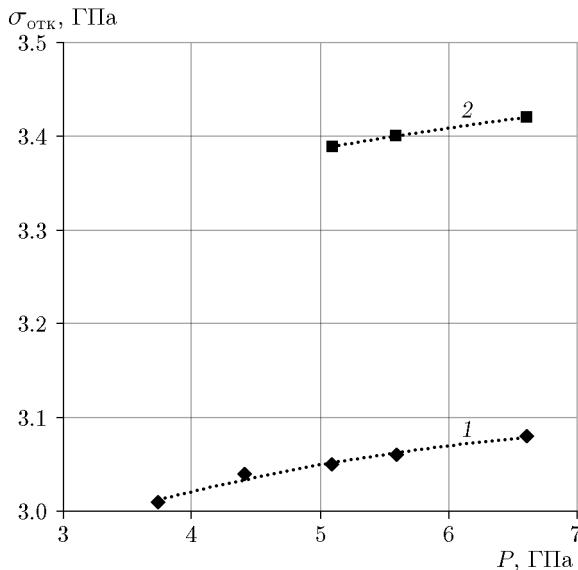


Рис. 6. Зависимость откольной прочности от амплитуды ударной волны образцов из традиционной стали 12Х18Н10Т (линия 1) и из СЛП-стали 12Х18Н10Т (линия 2)

ростях нагружения 203 и 238 м/с на обрабатываемой площади шлифов образцов из СЛП-стали выявлены дефекты, не связанные с действием растягивающих напряжений, приводящих к откольному разрушению. По-видимому, это результат компактирования дефектов, имеющихся в исходной структуре образцов. Поскольку в подсчет поврежденности включаются все дефекты, которые видны в оптический микроскоп, ширина зоны разрушения образцов в этих опытах большая, а реальная откольная поврежденность может быть еще ниже определяемой в экспериментах.

По результатам опытов были сделаны оценки откольной прочности $\sigma_{\text{отк}}$ всех испытанных образцов. Поскольку эксперименты проводили в постановке с одинаковой формой профиля импульса ударного сжатия и при одной и той же геометрии экспериментальной сборки, оценки были выполнены в приближении [22]:

$$\sigma_{\text{отк}} = \frac{\rho_0 C_L C_0}{C_L + C_0} \Delta W \left[1 + \frac{\delta_{\text{отк}}}{\Delta \tau} \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_L} \right) \right],$$

где ΔW — разница между максимальным и минимальным значениями скорости W , $\delta_{\text{отк}}$ — расстояние от свободной поверхности до зоны откола (толщина откольного слоя), $\Delta \tau$ — разница во времени между приходом на свободную поверхность волны разрежения и отколь-

ного импульса, C_0 — объемная скорость звука при нормальных условиях.

Зависимость откольной прочности от амплитуды ударной волны P , соответствующей скорости соударения ударника и мишени, показана на рис. 6. По приведенным на нем результатам в рассмотренном диапазоне нагружения среднее значение откольной прочности СЛП-стали составило $\sigma_{\text{отк}} \approx 3.4$ ГПа, что больше, чем у традиционной стали — $\sigma_{\text{отк}} \approx 3.05$ ГПа. Это хорошо согласуется с результатами металлографического анализа сохраненных после опытов образцов, согласно которым степень откольной поврежденности СЛП-стали меньше, чем традиционной стали, при одинаковых условиях ударного нагружения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием современных лабораторных комплексов высокоскоростных ударных воздействий, высокоточных методик регистрации волновых процессов и комплекса металлографических исследований определены прочностные свойства стали 12Х18Н10Т, изготовленной по технологии селективного лазерного плавления, при высокоскоростном ударном нагружении ($\dot{\varepsilon} \approx 0.35 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$). Согласно полученным результатам эти образцы имеют большую сопротивляемость кратковременному растяжению, возникающему в результате взаимодействия встречных волн разгрузки, по сравнению с горячекатаной сталью 12Х18Н10Т. Это подтверждается большими значениями откольной прочности и металлографическим анализом поперечных сечений сохраненных в опытах образцов.

Авторы выражают благодарность В. А. Брагунцу, А. О. Яговкину, А. Н. Баландиной, А. Ю. Немыгину за помощь в проведении и обработке результатов экспериментов и О. В. Трусову, А. В. Мефодьеву, С. А. Фарафонину за изготовление образцов из СЛП-стали.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики по государственному контракту № Н.4ц.241.4Д.23.1085.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. политехн. ун-та, 2013.
2. Валетов В. А. Аддитивные технологии (составление и перспективы): учеб. пособие. — СПб.: Ун-т ИТМО, 2015.
3. Иванов И. Р., Селезнёв В. Д. Моделирование и исследование лазерного плавления в методе 3D печати на примере порошка алюминия // Физика. Технология. Инновации: сб. науч. тр. / Уральский федеральный ун-т. — Екатеринбург, 2015. — Вып. 1. — С. 89–95.
4. Мельникова М. А., Колчанов Д. С., Мельников Д. М. Селективное лазерное плавление: применение и особенности формирования трехмерных конструктивных технологических элементов // Фотоника. — 2017. — № 2 (62). — С. 42–49. — DOI: 10.22184/1993-7296.2017.62.2.42.49. — EDN: YJBLVX.
5. Тарасова Т. А., Назаров А. М. Исследование процесса селективного лазерного плавления жаропрочных кобальтовых сплавов // Станкоинструмент. — 2015. — № 1. — С. 52–57. — EDN: WKRLQX.
6. Попович А. А., Суфияров В. Ш., Полозов И. А., Григорьев А. В. Селективное лазерное плавление интерметаллидного титанового сплава // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. — 2018. — № 1. — С. 26–35. — DOI: 10.17073/1997-308X-2018-1-26-35. — EDN: YSHZYC.
7. Зельдович В. И., Хомская И. В., Фролова Н. Ю., Хейфец А. Э., Абдуллина Д. Н., Петухов Е. А., Смирнов Е. Б., Шорохов Е. В., Клёнов А. И., Пильщиков А. А. Структура и механические свойства аустенитной нержавеющей стали, полученной методом селективного лазерного плавления // Физика металлов и металловедение. — 2021. — Т. 122, № 5. — С. 527–534. — DOI: 10.31857/S0015323021050132. — EDN: SIPHTD.
8. Мараниц А. В., Сентюрина Ж. А., Ядройцев И. А., Ядройцева И. А., Нарва В. К., Смуров И. Ю. Сравнение свойств материалов сталь — TiC, полученных методами лазерных технологий и порошковой металлургии // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. — 2013. — № 1. — С. 22–26. — EDN: PWRGDL.
9. Агаповичев А. В., Сотов А. В., Смелов В. Г., Зайцев И. О. Исследование структуры и механических свойств образцов, полученных с использованием технологии селективного лазерного сплавления из металлического титанового порошка марки Вт6 // IV Междунар. конф. «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» [Электронный ресурс]. — М., 2018. — С. 9–16.
10. Сухов Д. И., Базылева О. А., Неруш С. В. Особенности структуры и свойств материала жаропрочного интерметаллидного никелевого сплава, полученного методом селективного лазерного сплавления // IV Междунар. конф. «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» [Электронный ресурс]. — М., 2018. — С. 321–325.
11. Kurian A., Siva P. A comparison of corrosion resistance of stainless steel fabricated with selective laser melting and conventional processing // Int. J. Chem. Tech. Res. — 2014–2015. — V. 7, N 6. — P. 2632–2635.
12. Nie X., Zhang H., Zhu H., Hu Z., Ke L., Zeng X. Analysis of processing parameters and characteristics of selective laser melted high strength Al–Cu–Mg alloys: From single tracks to cubic samples // J. Mater. Process. Technol. — 2018. — V. 256. — P. 69–77. — DOI: 10.1016/j.jmatprotex.2018.01.030.
13. Zaretsky E., Stern A., Frage N. Dynamic response of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting // Mater. Sci. Eng: A. — 2017. — V. 688. — P. 364–370. — DOI: 10.1016/j.msea.2017.02.004.
14. Savinykh A. S., Garkushin G. V., Razorenov S. V., Atroshenko S. A., Klimova-Korsmik O. G., Kislov N. G. Strength properties of the heat-resistant inconel 718 superalloy additively manufactured by direct laser deposition method under shock compression // Metals. — 2022. — V. 12, N 6. — 967. — DOI: 10.3390/met12060967.
15. Разоренов С. В., Гаркушин Г. В., Савиных А. С., Климова-Корсмик О. Г., Шальнова С. А., Гущина М. О. Динамическая прочность титанового сплава Вт6, полученного методом прямого лазерного выращивания // Физ. мезомеханика. — 2021. — Т. 24, № 3. — С. 17–25. — DOI: 10.24412/1683-805X-2021-3-17-25. — EDN: TBUWRD.
16. Разоренов С. В., Гаркушин Г. В., Савиных А. С., Климова-Корсмик О. Г. Откольная прочность стали 09ХН2МД, полученной методами горячей прокатки и прямого лазерного выращивания, в субмикросекундном диапазоне длительности нагрузки // Физ. мезомеханика. — 2022. — Т. 25, № 5. — С. 57–65. — DOI: 10.55652/1683-805X.2022_25_5.57. — EDN: GVWNZY.
17. Gray G. T., III, Livescu V., Rigg P. A., Trujillo C. P., Cady C. M., Chen S. R., Carpenter J. S., Lienert T. J., Fensin S. J. Structure/property (constitutive and spallation response) of additively manufactured

- 316L stainless steel // Acta Materialia. — 2017. — V. 138. — P. 140–149. — DOI: 10.1016/j.actamat.2017.07.045.
18. Jones D. R., Fensin S. J., Dippo O., Beal R. A., Livescu V., Martinez D. T., Trujillo C. P., Florando J. N., Kumar M., Gray G. T., III. Spall fracture in additive manufactured Ti–6Al–4V // J. Appl. Phys. — 2016. — V. 120, N 13. — 135902. — DOI: 10.1063/1.4963279.
19. Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C., Whitworth T. L., Kuhlow W. W. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // Rev. Sci. Instrum. — 2006. — V. 77, N 8. — 083108. — DOI: 10.1063/1.2336749.
20. Трунин И. Р., Терешкина И. А., Подурец А. М., Симаков В. Г., Ткаченко М. И., Брагунец В. А., Баландина А. Н., Шестаков Е. Е. Откольное разрушение сплава ВНЖ-90 при его нагружении ударными волнами // ПМТФ. — 2019. — Т. 60, № 5. — С. 194–201. — DOI: 10.15372/PMTF20190520. — EDN: BMGUNQ.
21. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В. и др. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996.
22. Романченко В. И., Степанов Г. В. Зависимость критических напряжений от временных параметров нагрузки при отколе в меди, алюминии и стали // ПМТФ. — 1980. — № 4. — С. 141–147.

Поступила в редакцию 25.09.2023.

После доработки 20.11.2023.

Принята к публикации 29.11.2023.