

УДК 539.4

DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-3-309-320

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ НА КИНЕТИКУ
ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 12Х18Н10Т***

© 2024 г. Подурец А.М.^{1,2}, Складнева Т.О.¹, Терешкина И.А.^{1,2},
Ткаченко М.И.^{1,2}, Трунин И.Р.^{1,2}, Гнутов И.С.¹

¹*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация*

²*Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Саров, Российская Федерация*

staff@vniief.ru

Поступила в редакцию 18.04.2024

Получены результаты экспериментального исследования динамических прочностных характеристик стали 12Х18Н10Т при ударно-волновом сжатии до давлений 7 ГПа. Образцы созданы по технологии селективного лазерного сплавления при различных параметрах процесса изготовления. К основным параметрам процесса, кроме характеристик порошка, относятся режимные параметры работы лазера: диаметр пятна, мощность лазера, скорость сканирования лазерного луча, а также толщина слоя порошка, защитная атмосфера и т.п. Показано, что увеличение мощности сканирующего лазера и уменьшение толщины слоя порошка приводят к уменьшению количества внутренних дефектов в исходной структуре образцов. Приведено сравнение полученных в экспериментах прочностных характеристик со свойствами стали, изготовленной по традиционной технологии горячей прокатки. Ударно-волновые эксперименты проводились на легкогазовой пушке (рабочий газ гелий); диагностика волновых процессов проводилась по регистрации скорости движения свободной поверхности с помощью лазерного интерферометра PDV; степень откольного разрушения определялась по металлографическому анализу сохранных образцов.

Показано, что образцы из стали, изготовленные по технологии селективного лазерного сплавления, имеют большую откольную прочность и меньшую степень поврежденности по сравнению с горячекатаной сталью при одинаковых условиях высокоскоростного ударного нагружения. Согласно результатам металлографического исследования, наличие внутренних дефектов в исходной структуре образцов, связанное с выбором режима технологического процесса, не влияет на степень их откольного разрушения. При этом волновая картина распространения ударной волны существенно различается для образцов с дефектами и без них.

* Выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики по Государственному контракту №Н.4ц.241.4Д.23.1085.

Ключевые слова: сталь 12Х18Н10Т, селективное лазерное сплавление, микродефекты, скорость свободной поверхности, откольное разрушение, поврежденность.

Введение

В настоящее время продолжают интенсивно развиваться аддитивные технологии (АТ) формирования трехмерных объектов путем постепенного наращивания материала: лазерное спекание полимеров разного состава (селективное лазерное спекание) и лазерное сплавление металлических порошков (селективное лазерное сплавление – СЛС) [1–8].

Аддитивные технологии позволяют делать изделия сложной формы с высокой точностью и повторяемостью, что отличает АТ от традиционных методов изготовления. Поэтому АТ активно внедряются в ракетно-космической области, авиастроении, энергетике, химической промышленности, строительстве, медицине и многих других отраслях.

Здесь следует отметить, что при использовании технологии СЛС требуется поэтапная проработка процесса, включая построение подробной 3D-модели изделия, выбор оптимальных параметров используемой установки (принтера) для выращивания изделий из определенных порошков для исключения ряда негативных эффектов, таких как неполное расплавление частиц порошка, пористость, термическая деформация, трещины и т.п. Особое место при применении СЛС занимает изготовление деталей из материалов с заданными термодинамическими, механическими, прочностными свойствами. Для определения таких свойств материалов требуется проведение дополнительных исследований, которые позволят выявить особенности в их поведении и рассмотреть возможности использования изготовленных из этих материалов деталей при различных экстремальных условиях эксплуатации.

Интерес представляют деформационные и прочностные свойства материалов, которые определяют их способности изменять или восстанавливать форму и размер под действием внешних сил, а также сопротивляться разрушению. При этом свойства полученных материалов, в том числе и металлов, различаются в зависимости от уровня нагрузений, скоростей деформирования, температуры и т.п. [9–11]. В области высокоскоростных ударных нагрузок (скорости деформации порядка 10^5 – 10^6 с⁻¹) имеющиеся результаты ограничиваются единичными экспериментами с небольшим количеством СЛС-материалов [12–17].

Настоящая статья направлена на определение динамических прочностных свойств стали 12Х18Н10Т, изготовленной по технологии СЛС при различных режимах печати, и сравнение свойств СЛС-стали со сталью, изготовленной традиционным способом горячей прокатки (далее традиционная сталь).

Исследования проводились с применением современных лабораторных комплексов высокоскоростных ударных воздействий, прецизионной методики бесконтактной непрерывной доплеровской диагностики на основе оптической схемы PDV [18] и комплекса металлографических микроструктурных исследований.

1. Технология изготовления образцов

В качестве исходного материала для изготовления опытных образцов взят порошок на основе сплава 12Х18Н10Т производства ООО «Сфера М», г. Озёрск.

Определение параметров исходной металлопорошковой композиции и изготовление образцов по технологии СЛС выполнены в РФЯЦ–ВНИИЭФ [19].

Выращивание образцов методом селективного лазерного сплавления проводилось на аддитивной установке MeltMaster^{3D}-250 (ЦНИИТМАШ, Россия), которая оборудована двумя иттербиевыми волоконными лазерами Nd:YAG Laser с максимальной выходной мощностью 400 Вт и длиной волны 1075 ± 2 нм. Размеры рабочего объема «строительной камеры» составляли $250 \times 250 \times 250$ мм.

Для проведения исследований были изготовлены две партии заготовок, имеющих форму цилиндров высотой до 100 мм и диаметром до 12 мм. Из этих цилиндров параллельно плоскости сканирования лазерного луча вырезались образцы в виде дисков диаметром ~ 10 мм и толщиной ~ 4 мм.

Опытные образцы I партии выращивали при следующих параметрах печати: мощность лазера 180 Вт, диаметр лазерного пятна на поверхности порошка составлял ~ 50 мкм, образцы изготавливали в камере в защитной атмосфере азота, скорость сканирования 650 мм/с, шаг сканирования 60 мкм, толщина слоя наносимого порошка 50 мкм. Применялась линейная стратегия сканирования лазерным лучом «зиг-заг». На рис. 1 представлены фрагменты микроструктуры срезов образцов.

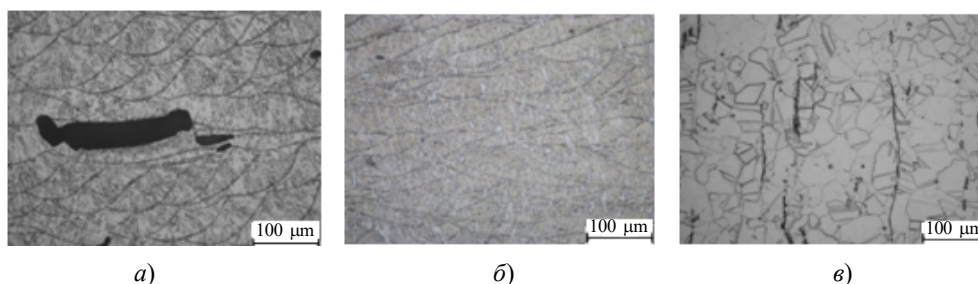


Рис. 1. Внутренняя структура образцов (увеличение $\times 200$):
a – СЛС-сталь (I партия), *б* – СЛС-сталь (II партия), *в* – традиционная сталь

На фоне характерной при СЛС плотной ячеистой (чешуйчатой) структуры, являющейся отражением технологии изготовления материала, согласно которой происходят полное расплавление исходного порошка и охлаждение расплава со скоростью до 10^6 °C/с, в образце из I партии заготовок видны области, имеющие микроскопические пустоты (рис. 1*a*).

Чтобы уменьшить содержание внутренних дефектов, были изменены режимы печати заготовок II партии: мощность лазера увеличена со 180 до 210 Вт, толщина слоя наносимого порошка уменьшена с 50 до 45 мкм (см. рис. 1*б*).

После изготовления все заготовки I и II партий отжигали в вакууме до температуры 750 °C. Скорость нагрева составляла 15–20 °C/мин, время выдержки при температуре – 1 час, последующее охлаждение образцов с печью до 20 °C.

Методом гидростатического взвешивания определена плотность исходных образцов, которая составила $\rho_0 = 7,78$ г/см³ для образцов I партии и $\rho_0 = 7,88$ г/см³ для II партии. Плотность образцов традиционной стали $\rho_0 = 7,89$ г/см³. Ультразвуковым методом измерена продольная скорость звука $C_L = 5,33$ км/с для образцов I партии, $C_L = 5,86$ км/с для II партии, $C_L = 5,81$ км/с для традиционной стали. Эти характеристики исследуемых сплавов использовались для оценки их динамической и откольной прочности при высокоскоростном ударном нагружении.

2. Постановка экспериментов

Эксперименты проводились в постановке, согласно которой плоский ударник, разогнанный в стволе нагружающей установки пушечного типа калибром 50 мм, соударялся с мишенным блоком, на котором закреплялась обойма с двумя встроенными в нее образцами. Схема размещения образцов диаметром 10 мм и толщиной 4 мм, равной толщине обоймы, приведена на рис. 2. Выбор геометрических размеров определялся, во-первых, требованиями измерительной системы (оптический датчик располагается на свободной поверхности образца), во-вторых, образцы должны находиться в плоском пятне, диаметр которого составляет ~ 25 мм, и не оказывать взаимного влияния на волновые процессы, возникающие в образцах при нагружении.

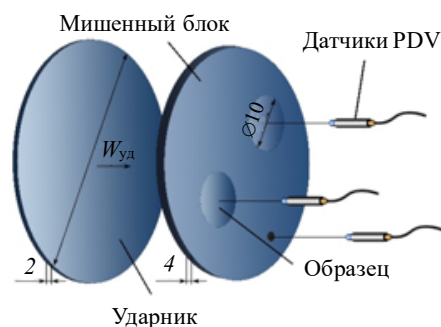


Рис. 2. Схема постановки опыта

Нагружение мишенного блока с образцами проводилось ударником из традиционной стали толщиной 2 мм и диаметром 45 мм.

Проведены опыты с СЛС-образцами I партии с исходной структурой, имеющей внутренние микродефекты (см. рис. 1а) и с СЛС-образцами II партии (см. рис. 1б). Для сравнения при тех же скоростях ударника проведены опыты с образцами, изготовленными по традиционной технологии (см. рис. 1в).

С помощью методики PDV регистрировалась подлетная скорость ударника к мишени $W_{уд}$, которая для опытов I партии варьировалась от 165 до 450 м/с, для II партии – от 203 до 350 м/с, и скорости движения свободных поверхностей образцов $W(t)$.

После каждого опыта сохраненные образцы разрезали, проводили металлографический анализ шлифов их поперечных срезов и делали оценки количественной величины поврежденности ω в постопытных образцах: поврежденность определялась как отношение площади пор к общей площади шлифа образца.

3. Результаты и анализ экспериментов

3.1. Опыт с первой партией заготовок. С I партией заготовок проведено пять экспериментов. Во всех опытах регистрировалась зависимость скорости движения свободной поверхности образцов от времени $W(t)$. После каждого эксперимента сохраненные образцы разрезались и определялась степень их разрушения.

Зависимости $W(t)$, полученные после обработки экспериментальных спектрограмм, и фотографии поперечных сечений сохраненных в опытах образцов приведены на рис. 3, на котором номера кривых 1–5 соответствуют скоростям $W_{уд}$: 1 – 165 м/с, 2 – 225 м/с, 3 – 279 м/с, 4 – 325 м/с, 5 – 450 м/с.

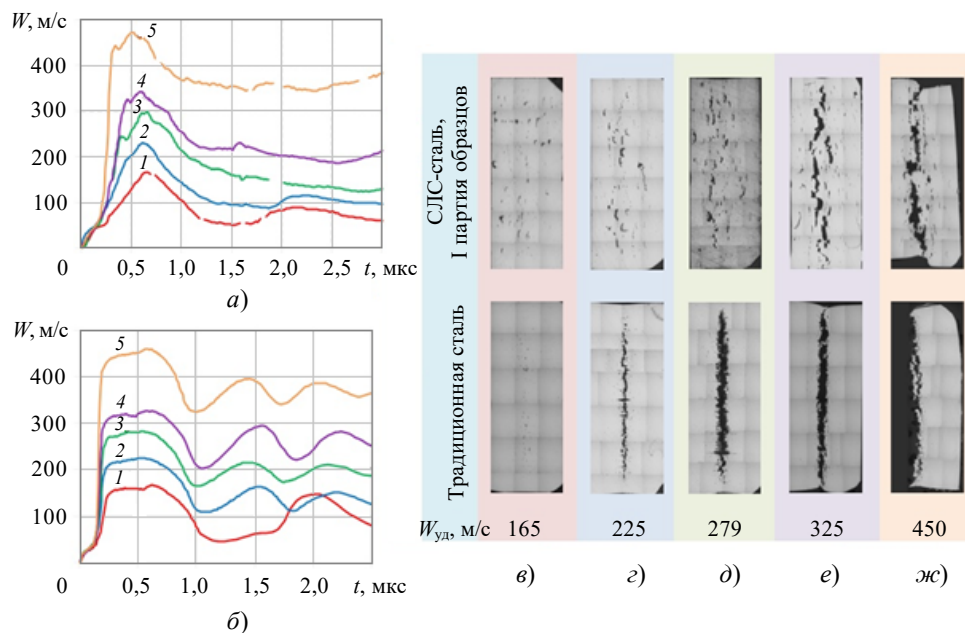


Рис. 3. Результаты экспериментов: зависимости скорости движения свободной поверхности образцов из СЛС-стали (I партия образцов) (а) и традиционной стали (б), поперечные сечения сохраненных образцов, увеличение $\times 50$ (в–ж)

По результатам экспериментов (см. рис. 3) установлено:

1. Для откольного разрушения исследуемых сталей характерна многостадийность – реализуются этапы развития внутренней поврежденности от образования небольшого количества микродефектов до разрастания их в магистральную трещину. При визуальном рассмотрении фотографий поперечных срезов образцов (см. рис. 3в–ж) уровень поврежденности СЛС-образцов меньше, чем у образцов традиционной технологии. При скорости соударения 450 м/с образец из традиционной стали разделился на две части, тогда как образец из СЛС-стали полностью не разрушился, но имел зону поврежденности в виде магистральной трещины.

2. При практически одинаковом максимальном значении $W(t)$ (см. рис. 3а,б) для образцов из СЛС-стали и традиционной стали сильно отличаются наклоны фронтального участка, длительности стационарного участка $W(t)$ (у образца из СЛС-стали он отсутствует) и откольные импульсы (у образца из СЛС-стали отсутствует характерный при откольном разрушении явно выраженный минимум скорости на зависимости $W(t)$).

3. При анализе поперечных сечений образцов СЛС-стали, исходного и сохраненных после нагружения, на фоне зоны формирования откола (зона, где в образце взаимодействуют встречные волны разрежения) видны трещины, которые являются результатом схлопывания микропор, содержащихся в исходной структуре образца.

По полученным результатам ударно-волновых экспериментов сделано предположение, что выявленные особенности в поведении СЛС-стали связаны с наличием в исходной внутренней структуре образцов периодически расположенных однотипных скругленных участков – следов расплава, а также неоднородностей и дефектов типа пустот. Подтверждение высказанной гипотезы было получено при испытании образцов, имеющих практически бездефектную структуру – образцов СЛС-стали II партии.

3.2. Опыты со второй партией заготовок. С образцами из II партии заготовок проведено пять опытов. Постановка экспериментов была аналогична схеме опытов (см. рис. 2) для I партии образцов. Для более детального рассмотрения многостадийности откольного разрушения диапазон скоростей соударения во II партии опытов был уменьшен по сравнению с I партией.

Зависимости скорости движения свободных поверхностей всех образцов, полученные после обработки PDV-спектрограмм, и фотографии поперечных сечений сохраненных в опытах образцов, приведены на рис. 4, на котором номера кривых 1–5 соответствуют скоростям $W_{уд}$: 1 – 203 м/с, 2 – 238 м/с, 3 – 273 м/с, 4 – 295 м/с, 5 – 350 м/с.

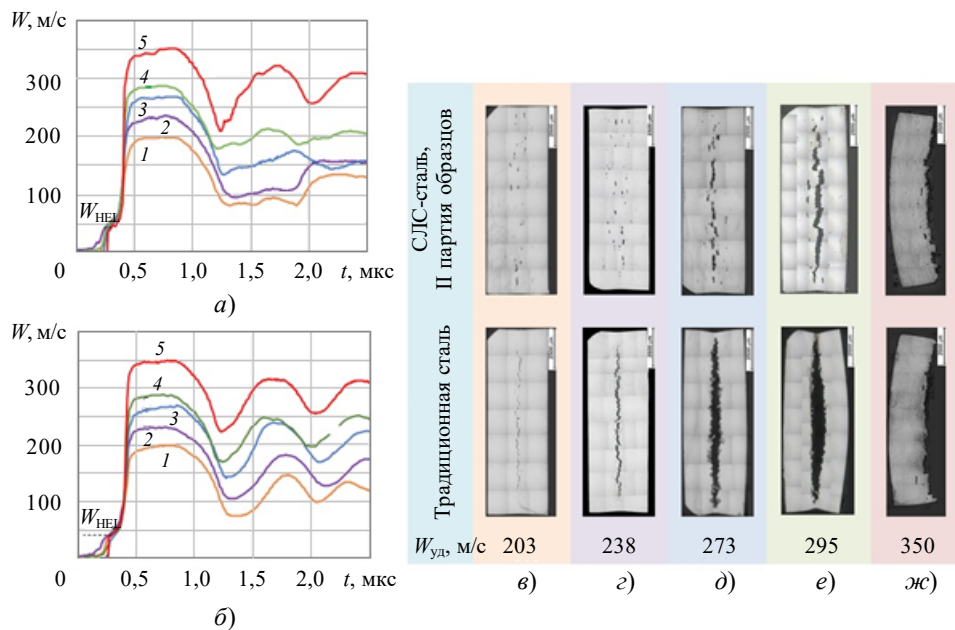


Рис. 4. Результаты экспериментов: зависимости скорости движения свободной поверхности образцов из СЛС-стали (II партия образцов) (а) и традиционной стали (б), поперечные сечения сохраненных образцов, увеличение $\times 50$ (в–ж)

При скорости соударения 350 м/с (см. рис. 4ж) все образцы разделились на две части, структура фрагментов неразрушенной части образцов соответствует исходной структуре, а профили $W(t)$ передают все особенности волновых течений в образцах при полном откольном разрушении.

Из результатов опытов со II партией заготовок видно, что профили скорости движения свободной поверхности образцов из СЛС-стали и традиционной стали на фронтальных участках зависимости $W(t)$ совпадают.

Во всех опытах с разными партиями образцов (см. рис. 3, 4) на профилях $W(t)$ зарегистрирована двухволновая конфигурация фронта ударной волны (УВ), связанная с разделением УВ на упругий предвестник, который распространяется со скоростью, соответствующей продольной скорости звука C_L , и пластическую волну, догоняющую предвестник со скоростью УВ D . При этом амплитуда упругого предвестника W_{HEL} (см. рис. 4) практически одинакова для всех типов образцов. Динамический предел текучести

$$Y_d = \frac{1}{2} \rho_0 C_L W_{\text{HEL}} \frac{1-2\nu}{1-\nu} \quad (1)$$

(ν – коэффициент Пуассона) при ударно-волновом воздействии для образцов стали, изготовленных из II партии заготовок и по традиционной технологии, будет примерно одинаков $Y_d \approx 0,56$ ГПа. Для I партии СЛС-образцов $Y_d \approx 0,51$ ГПа из-за их меньшей плотности и более низкой продольной скорости звука. Отметим, что при скоростях деформации $\dot{\epsilon} \sim 10^4 \text{ с}^{-1}$, которые достигаются в экспериментах по методу Кольско-го – Гопкинсона, предел текучести $\sigma_{0,2}$ для СЛС-стали примерно в 2 раза выше, чем у стали, изготовленной традиционным способом [20].

Отличие в зарегистрированных профилях $W(t)$ становится заметным при определении выхода УВ на свободную поверхность, которая образуется после отражения волны разгрузки от зоны разрушения. На зависимости $W(t)$ у образцов из СЛС-стали II партии при скоростях соударения $W_{\text{уд}}$, равных 203 и 238 м/с, выход отраженной от зоны разрушения УВ не регистрируется, что свидетельствует об отсутствии внутреннего разрушения образцов.

Для остальных опытов со II партией образцов из СЛС-стали удалось оценить значения откольной прочности (для I партии это сделать не получилось, поскольку нет выраженного минимума на зависимости $W(t)$, см. рис. 3). Для оценки значений $\sigma_{\text{отк}}$ использовалась формула из [21]:

$$\sigma_{\text{отк}} = \frac{\rho_0 C_L C_0}{C_L + C_0} \Delta W \left[1 + \frac{\delta_{\text{отк}}}{\Delta \tau} \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_L} \right) \right], \quad (2)$$

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 откольного 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. 5.

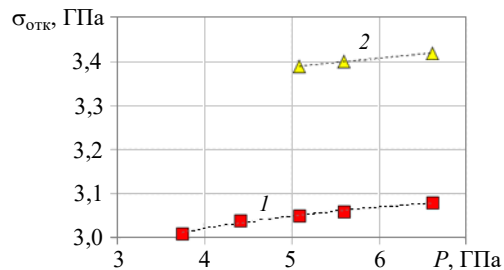


Рис. 5. Зависимость откольной прочности от амплитуды ударной волны:
1 – традиционная сталь, 2 – СЛС-сталь

Согласно результатам, приведенным на рис. 5, значения откольной прочности стали, изготовленной по технологии СЛС, превышают $\sigma_{\text{отк}}$ традиционной стали и составляют в рассмотренном диапазоне ударных нагрузок 3,4 ГПа; у традиционной стали $\sigma_{\text{отк}} \approx 3,0-3,1$ ГПа.

По результатам обработки поперечных срезов образцов были сделаны оценки внутренней поврежденности во всех испытанных типах образцов [22]. Сравнение общей поврежденности СЛС-стали, изготовленной с различными параметрами печати,

и традиционной стали приведено на рис. 6. Как следует из изображений поперечных срезов образцов и рис. 6, общая поврежденность ω стали, изготовленной традиционным способом горячей прокатки, превышает аналогичные значения для стали, изготовленной по технологии СЛС. При скорости соударения $W_{уд} > 270$ м/с в образце из традиционной стали образуется раскрытая магистральная трещина, в СЛС-образцах – отдельные дефекты, выстроенные в линию, и ω в ~6 раз больше у традиционной стали.

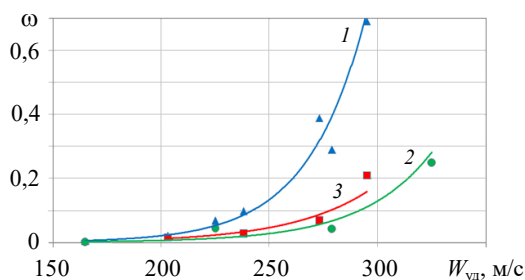


Рис. 6. Зависимость поврежденности от скорости соударения:
1 – традиционная сталь, 2 – СЛС-сталь I партии, 3 – СЛС-сталь II партии

При скоростях нагружения 203 и 238 м/с на обрабатываемой площади шлифов СЛС-образцов II партии и при $W_{уд} < 270$ м/с для образцов I партии выявлены дефекты, не связанные с действием растягивающих напряжений, приводящих к откольному разрушению. По-видимому, это результат компактирования дефектов, имеющих в исходной структуре образцов. Поэтому, поскольку в подсчет поврежденности включаются все дефекты, которые видны в оптический микроскоп, реальная откольная поврежденность, особенно образцов I партии, где в исходной структуре количество внутренних дефектов было значительное, может быть еще ниже определяемой в экспериментах.

Заключение

Согласно полученным результатам, образцы из стали 12Х18Н10Т, изготовленные по технологии СЛС с разными режимами печати и имеющие различную начальную пористость, проявляют бóльшую сопротивляемость кратковременному растяжению, возникающему в результате взаимодействия встречных волн разгрузки, по сравнению с образцами из горячекатаной стали 12Х18Н10Т. Это подтверждается бóльшими значениями откольной прочности и меньшей степенью разрушения СЛС-образцов при одинаковых условиях ударного нагружения.

Авторы выражают благодарность В.В. Симакову, Е.Е. Шестакову, В.А. Брагунцу, А.О. Яговкину, А.Н. Баландиной, А.Ю. Немыгину за помощь в проведении и обработке результатов экспериментов и И.В. Пикулину, О.В. Трусову, А.В. Мефодьеву, С.А. Фарафшину за изготовление образцов из СЛС-стали.

Список литературы

1. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. *Аддитивные технологии в машиностроении*. СПб.: Изд-во политехнического университета, 2013. 222 с.
2. Валетов В.А. *Аддитивные технологии (состояние и перспективы)*. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 63 с.
3. Шишковский И.В. *Основы аддитивных технологий высокого разрешения*. СПб.: Изд-во Питер, 2016. 400 с.

4. Иванов И.Р., Селезнёв В.Д. Моделирование и исследование лазерного плавления в методе 3D печати на примере порошка алюминия. *Физика. Технология. Инновации: Сб. науч. трудов*. 2015. Т. 1. С. 89–95.
5. 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.
6. Brandl E., Heckenberger U., Holzinger V., Buchbinder D. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue and fracture behavior. *Materials and Design*. 2012. Vol. 34. P. 159–169. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.067.
7. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 371–392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
8. Gu D., Shi X., Poprawe R., Bourell D.L., Setchi R., Zhu J. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing. *Science*. 2021. Vol. 372. Article No 6545. DOI: 10.1126/science.abg1487.
9. Amir B., Samuha S., Sadot O. Influence of selective laser melting machine source on the dynamic properties of AlSi10Mg alloy. *Materials*. 2019. № 12. P. 1143-2 – 1143-16. DOI: 10.3390/ma12071143.
10. Tonelli L., Liverani E., Di Egidio G., Fortunato A., Morri A., Ceschini L. On the role of microstructure and defects in the room and high-temperature tensile behavior of the PBF-LB A357 (AlSi7Mg) alloy in as-built and peak-aged conditions. *Materials*. 2023. Vol. 16. Iss. 7. P. 2721-1 – 2721-20. DOI: 10.3390/ma16072721.
11. Ming W., Chen J., An Q., Chen M. Dynamic mechanical properties and machinability characteristics of selective laser melted and forged Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 271. P. 284–292. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.015.
12. Zaretsky E., Stern A., Frage N. Dynamic response of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting. *Materials Science & Engineering*. 2017. A 688. P. 364–370. DOI: 10.1016/j.msea.2017.02.004.
13. 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. Vol. 12. Iss. 6. P. 967-1 – 967-15. DOI: 10.3390/met12060967.
14. Разоренов С.В., Гаркушин Г.В., Савиных А.С. и др. Динамическая прочность титанового сплава ВТ6, полученного методом прямого лазерного выращивания. *Физическая мезомеханика*. 2021. Т. 24. №3. С. 17–25. DOI: 10.24412/1683-805X-2021-3-17-25.
15. Разоренов С.В., Гаркушин Г.В., Савиных А.С. и др. Откольная прочность стали 09ХН2МД, полученной методами горячей прокатки и прямого лазерного выращивания, в субмикросекундном диапазоне длительности нагрузки. *Физическая мезомеханика*. 2022. Т. 25. №5. С. 57–65. DOI: 10.55652/1683-805x_2022_25_5_57.
16. Gray G.T., Livescu V., Rigg P.A. et al. Structure/property (constitutive and spallation response) of additively manufactured 316L stainless steel. *Acta Materialia*. 2017. Vol. 138. P. 140–149. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.07.045.
17. Jones D.R., Fensin S.J., Diplo O. et al. Spall fracture in additive manufactured Ti-6Al-4V. *Journal of Applied Physics*. 2016. Vol. 120. Iss. 13. P. 135902-1 – 135902-8. DOI: 10.1063/1.4963279.
18. Strand O.T. et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques. *Review Scientific Instruments*. 2006. Vol. 77. Iss. 8. Article No 083108. DOI: 10.1063/1.2336749.
19. Складнева Т.О., Адигамов М.С., Брагунец В.А. и др. Откольное разрушение образцов из стали 12Х18Н10Т, изготовленных методом селективного лазерного плавления. *Международная конференция XXIII Харитоновские тематические научные чтения: Сб. тез. докл.* 2022. С. 157–163.
20. Зельдович В.И., Хомская И.В., Фролова Н.Ю. и др. 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
21. Романченко В.И., Степанов Г.В. Зависимость критических напряжений от времен-

ных параметров нагрузки при отколе в меди, алюминии и стали. *Прикладная механика и техническая физика*. 1980. Т. 21. Вып. 4. С. 141–147.

22. Трунин И.Р., Терешкина И.А., Подурец А.М. и др. Откольное разрушение сплава ВНЖ-90 при его нагружении ударными волнами. *Прикладная механика и техническая физика*. 2019. Т. 60. №5. С. 194–201. DOI: 10.15372/PMTF20190520.

References

1. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylyna I.N. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive Technologies in Mechanical Engineering]. Saint Petersburg. Saint Petersburg Polytechnic University Publ. 2013. 222 p. (In Russian).

2. Valetov V.A. *Additivnye tekhnologii (sostoyanie i perspektivy)* [Additive Technologies (State and Prospects)]. Saint Petersburg. ITMO University Publ. 2015. 63 p. (In Russian).

3. Shishkovskiy I.V. *Osnovy additivnykh tekhnologiy vysokogo razresheniya* [Fundamentals of High-Resolution Additive Technologies]. Saint Petersburg. Peter Publ. 2016. 400 p. (In Russian).

4. Ivanov I.R., Seleznev V.D. Modelirovanie i issledovanie lazernogo plavleniya v metode 3D pechati na primere poroshka alyuminiya [Modeling and investigation of laser melting in the 3D printing method using the example of aluminum powder]. *Fizika. Tekhnologiya. Innovatsii: Sbornik nauchnykh trudov* [Physics. Technology. Innovation: Collection of Scientific Papers]. 2015. Vol. 1. P. 89–95 (In Russian).

5. Melnikova M.A., Kolchanov D.S., Melnikov D.M. Selective laser melting: application and features of three-dimensional structural engineering elements formation. *Photonics*. 2017. No2/62/. P. 42–49. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.62.2.42.49.

6. Brandl E., Heckenberger U., Holzinger V., Buchbinder D. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue and fracture behavior. *Mater. Des.* 2012. Vol. 34. P. 159–169. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.067.

7. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Mater.* 2016. Vol. 117. P. 371–392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.

8. Gu D., Shi X., Poprawe R., Bourell D.L., Setchi R., Zhu J. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing. *Science*. 2021. Vol. 372. Article No 6545. DOI: 10.1126/science.abg1487.

9. Amir B., Samuha S., Sadot O. Influence of selective laser melting machine source on the dynamic properties of AlSi10Mg alloy. *Materials*. 2019. № 12. P. 1143-2 – 1143-16. DOI: 10.3390/ma12071143.

10. Tonelli L., Liverani E., Di Egidio G., Fortunato A., Morri A., Ceschini L. On the role of microstructure and defects in the room and high-temperature tensile behavior of the PBF-LB A357 (AlSi7Mg) alloy in as-built and peak-aged conditions. *Materials*. 2023. Vol. 16. Iss. 7. P. 2721-1 – 2721-20. DOI: 10.3390/ma16072721.

11. Ming W., Chen J., An Q., Chen M. Dynamic mechanical properties and machinability characteristics of selective laser melted and forged Ti6Al4V. *J. Mater. Process. Technol.* 2019. Vol. 271. P. 284–292. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.015.

12. Zaretsky E., Stern A., Frage N. Dynamic response of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting. *Mater. Sci. Eng.* 2017. A 688. P. 364–370. DOI: 10.1016/j.msea.2017.02.004.

13. 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. Vol. 12. Iss. 6. P. 967-1 – 967-15. DOI: 10.3390/met12060967.

14. Razorenov S.V., Garkushin G.V., Savinykh A.S. et al. Dinamicheskaya prochnost titanovogo splava VT6, poluchennogo metodom pryamogo lazernogo vyrashchivaniya [Dynamic strength of VT6 titanium alloy produced by laser direct manufacturing]. *Fizicheskaya mekhanika [Physical Mesomechanics]*. 2021. Vol. 24. No 3. P. 17–25 (In Russian).

15. Razorenov S.V., Garkushin G.V., Savinykh A.S. et al. Otkolnaya prochnost stali 09KhNi2MD, poluchennoy metodami goryachey prokatki i pryamogo lazernogo vyrashchivaniya, v submikrosekundnom diapazone dlitelnosti nagruzki [Spall strength of steel 09CrNi2MoCu obtained by hot rolling and direct laser deposition in the submicrosecond loading

range]. *Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics]*. 2022. Vol. 25. No 5. P. 57–65 (In Russian).

16. Gray G.T., Livescu V., Rigg P.A. et al. Structure/property (constitutive and spallation response) of additively manufactured 316L stainless steel. *Acta Mater.* 2017. Vol. 138. P. 140–149. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.07.045.

17. Jones D.R., Fensin S.J., Diplo O. et al. Spall fracture in additive manufactured Ti-6Al-4V. *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 120. Iss. 13. P. 135902-1–135902-8. DOI: 10.1063/1.4963279.

18. Strand O.T. et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques. *Rev. Sci. Instrum.* 2006. Vol. 77. Iss. 8. Article No 083108. DOI: 10.1063/1.2336749.

19. Sklyadneva T.O., Adigamov M.S., Bragunets V.A. i dr. Otkolnoe razrushenie obraztsov iz stali 12Kh18N10T, izgotovlennykh metodom selektivnogo lazernogo plavlenniya [Spall fracture of specimens of steel 12Cr18Ni10Ti manufactured using selective laser melting]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya XXIII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya: Sbornik tezisov dokladov [XXIII Kharitonov Thematic Scientific Readings: Collection of Abstracts of Reports]*. 2022. P. 157–163 (In Russian).

20. Zel'dovich V.I., Khomshaya I.V., Frolova N.Y. et al. Structure and mechanical properties of austenitic stainless steel prepared by selective laser melting. *Physics of Metals and Metallography*. 2021. Vol. 122. Iss. 5. P. 491–497. <https://doi.org/10.1134/S0031918X21050136>.

21. Romanchenko V.I., Stepanov G.V. Dependence of the critical stresses on the loading time parameters during spall in copper, aluminum and steel. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1980. Vol. 21. Iss. 4. P. 555–561. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00916495>.

22. Trunin I.R., Tereshkina I.A., Podurets A.M. et al. Otkolnoe razrushenie splava VNZh-90 pri ego nagruzhennii udarnymi volnami [Spall fracture of a VNZH-90 alloy under a shock wave load]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 2019. Vol. 60. No 5. P. 194–201 (In Russian).

INFLUENCE OF PARAMETERS OF OPERATING CONDITIONS OF SELECTIVE LASER MELTING ON SPALL FRACTURE KINETICS OF 12Cr18Ni10Ti STEEL*

Podurets A.M.^{1,2}, Sklyadneva T.O.¹, Tereshkina I.A.^{1,2}, Tkachenko M.I.^{1,2},
Trunin I.R.^{1,2}, Gnutov I.S.¹

¹Russian Federal Nuclear Center–All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russian Federation

²Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University MEPhI,
Sarov, Russian Federation

postmaster@ifv.vniief.ru

Received by the Editor 2024/04/18

The results are presented with regard to experimental studies of dynamic strength characteristics of samples made of 12Cr18Ni10Ti steel powder. They were obtained through selective laser melting with various parameters of a technological process at shock-wave compression up to pressures of ~7 GPa. Critical parameters of a process, in addition to powder characteristics, include laser operating conditions: a laser spot diameter, laser power, a laser beam scanning velocity, as well as a powder layer thickness, protective atmosphere, etc. It has been demonstrated that an increase in the scan laser power and a decrease in a powder layer thickness bring about a decrease in a number of internal defects in initial structures of samples. The results are given, which compare strength characteristics of these steels with properties of steel produced by a traditional technique of hot rolling. Shock-wave experiments were carried

*The paper was implemented in the framework of the scientific program of the National Center of Physics and Mathematics under the State Contract No H.4И.241.4Д.23.1085.

out using a light gas gun-type facility, which makes it possible to accelerate flat impactors to speeds of ~ 700 m/s; internal wave processes in samples were reproduced when recording a rate of movement of the sample's free surface via a PDV laser interferometer; a degree of spall fracture was determined by the help of a metallographic analysis of samples recovered in tests. It has been showed that steel samples made through a selective laser melting technique have high spall strength and a lower degree of damage compared to hot-rolled steel under the same conditions of high-speed shock loading. According to the results of the metallographic studies, the presence of internal defects in initial structures of samples associated with a choice of operating conditions of a manufacturing process does not affect a degree of their spall damage. At the same time, a wave pattern of shock wave propagation differs significantly for samples with and without defects.

Keywords: 12Cr18Ni10Ti steel, selective laser melting, microdefects, free surface velocity, spall fracture, damage.