

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 669.27:539.4

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПСЕВДОСПЛАВОВ ВОЛЬФРАМА С НИКЕЛЕМ И ЖЕЛЕЗОМ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2022 г. А. М. Подурец^{a, b}, М. И. Ткаченко^{a, b}, А. Н. Баландина^a, В. Г. Симаков^{a, b},
В. А. Брагунец^a, Е. Е. Шестаков^{a, b}, М. С. Адигамов^b, И. А. Терешкина^{a, b}, И. Р. Трунин^{a, b, *}

^aРоссийский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская обл., 607188 Россия

^bСаровский ФТИ НИЯУ МИФИ, ул. Духова, 6, Саров, Нижегородская обл., 607186 Россия

*e-mail: TIRSarov@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.01.2022 г.

После доработки 30.08.2022 г.

Принята к публикации 10.09.2022 г.

Проведена серия экспериментов по ударно-волновому нагружению и откольному разрушению сплавов вольфрама с никелем и железом. Показано, что разрушение сплавов происходит по железо-никелевой связке и не затрагивает частиц вольфрама. При сжатии образцов в ударной волне в сплаве с большим (95 вес. %) содержанием вольфрама были обнаружены линейные дефекты предположительно двойникового происхождения, наибольшее количество которых наблюдается вблизи поверхности соударения.

Ключевые слова: сплав вольфрама с никелем и железом, откольное разрушение, металлографический анализ, трещины, линейные дефекты

DOI: 10.31857/S0015323022100187

ВВЕДЕНИЕ

Прочностные свойства металлов и сплавов при ударно-волновом нагружении, которые характеризуют сопротивляемость деформации и разрушению, чувствительны к структуре материалов.

Целью настоящей работы был анализ структуры сплавов вольфрама с никелем и железом (ВНЖ) различного состава, образцы которых были подвергнуты ударному нагружению и откольному разрушению при высокоскоростном растяжении.

Информация об откольном разрушении данных сплавов носит ограниченный характер, а определенная из экспериментальных данных [1, 2] откольная прочность сплава ВНЖ 95 составила ~1.2 ГПа [1], сплава ВНЖ 90 ~1.00–1.25 ГПа [2], тогда как в поликристаллическом вольфраме откольная прочность равна ~0.4–0.7 ГПа [3].

Сплавы вольфрама с никелем и железом, содержащие, как правило, от 90 вес. % до 98 вес. % вольфрама, относятся к классу псевдосплавов, в которых компоненты сплава обладают ограниченной взаимной растворимостью и сильно различаются по физическим свойствам, главное из которых – температура плавления. Так, для ком-

понентов сплава ВНЖ температура плавления: вольфрама – $T_{пл} = 3414^\circ\text{C}$, железа – $T_{пл} = 1539^\circ\text{C}$, никеля – $T_{пл} = 1453^\circ\text{C}$.

Существуют различные способы получения порошковых вольфрамовых сплавов:

1. Традиционный метод жидкофазного спекания (ЖФС) порошков компонентов сплава в различных средах при температуре спекания $T_c \sim 1500^\circ\text{C}$ [4]. Сплавы, полученные путем ЖФС, имеют неоднородную крупнозернистую структуру и низкие прочностные свойства [5].

2. Для повышения механических характеристик вольфрамовых псевдосплавов применяется технология твердофазного электроимпульсного плазменного спекания (SPS) [6, 7] порошков компонентов сплава, имеющих нанодисперсную структуру (размер частиц вольфрама ~5 мкм). Такой способ получения сплава позволяет облегчить процесс прессования, уменьшить T_c и сократить время выдержки при T_c . И, как показано в ряде работ, например [7, 8], сплавы, изготовленные SPS-способом, демонстрируют более высокие статические и динамические механические свойства.

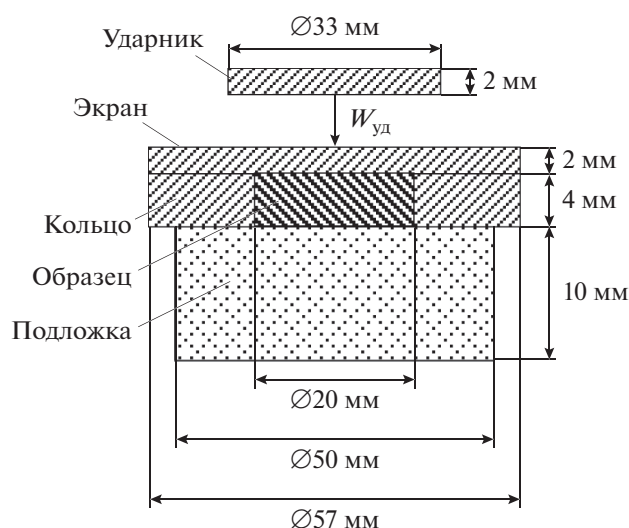


Рис. 1. Схема эксперимента по нагружению образцов из ВНЖ.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Исследуемые в настоящей работе образцы из вольфрама с никелем и железом были получены в лабораторных условиях по технологии ЖФС. Предварительно осуществляли прессование шихты в пресс-форме из графита давлением 20 МПа (ВНЖ 90) и 25 МПа (ВНЖ 95). Спекание заготовки проводили в индукционной печи в среде осушенного водорода по режиму: нагрев до температуры 950°C за 0.5 ч, выдержка в течение 1 ч; нагрев до температуры 1350°C (ВНЖ 90) и 1390°C (ВНЖ 95) за 1.5 ч, выдержка в течение 1 ч, охлаждение вместе с печью.

Эксперименты по ударному нагружению плоских образцов из сплавов ВНЖ проводили по схеме, приведенной на рис. 1 (материалы ударника, экрана, кольца и образца – сплав ВНЖ, подложки – фторопласт; все размеры сборки приведены на рисунке). Выбор условий проведения опытов (размеры сборки, материал подложки, скорости соударения) определялся требованием создания в срединном сечении образца условий для возникновения растягивающих напряжений и, соответственно, откольного разрушения и необходимостью сохранения образцов для их дальнейшего металлографического анализа. Первоначальной целью экспериментов было исследование откольного разрушения сплавов ВНЖ 90 и ВНЖ 95.

Разгон ударника осуществлялся в стволе легкогазовой установки пушечного типа калибра 40 мм. Скорость полета ударника к мишени (экран + образец + подложка) варьировалась в диапазоне (134–199) м/с, ее значение определяли с помощью специального лазерного устройства,

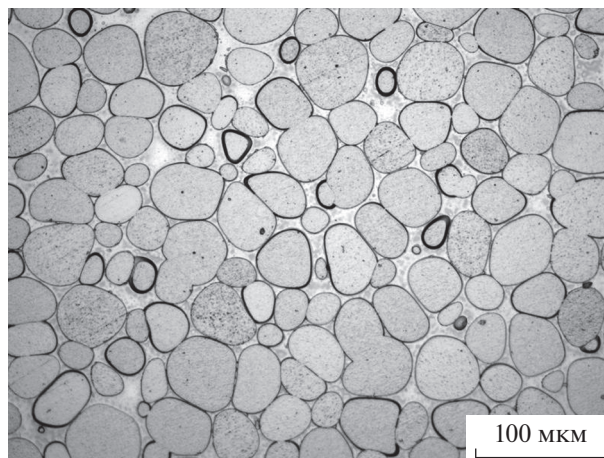


Рис. 2. Структура сплава ВНЖ 90 в исходном состоянии.

позволяющего проводить измерения с относительной погрешностью ~3%. В такой постановке эксперимента амплитуда ударной волны, создаваемой в исследуемых материалах, оставалась постоянной по всей толщине образца.

Оценку максимальных значений напряжений и длительности воздействия ударной волны, которые создавались в образцах, в рассмотренной постановке эксперимента и при различных скоростях нагружения проводили по результатам численного моделирования.

После каждого эксперимента методом оптической металлографии с помощью микроскопа AXIOVERT 40MAT изучали структуру сохраненных после нагружения образцов.

Также предварительно исследовали структуру сплава ВНЖ 90 и ВНЖ 95 после спекания.

Структура сплава ВНЖ 90 (90 вес. % W, 7 вес. % Ni, 3 вес. % Fe; $\rho_0 = 17.1 \text{ г/см}^3$) представлена на рис. 2. Сплав имеет неоднородную структуру, состоящую из частиц вольфрама (средний размер $35 \pm 12 \text{ мкм}$) и γ -твердого раствора Ni–Fe.

Структура сплава ВНЖ 95 (95 вес. % W, 3.5 вес. % Ni, 1.5 вес. % Fe; $\rho_0 = 18.1 \text{ г/см}^3$) приведена на рис. 3. Средний размер частиц вольфрама $60 \pm 30 \text{ мкм}$.

Различие в составе, как следует из приведенных фотографий, приводит к различиям в микроструктуре: в сплаве ВНЖ 90 частицы вольфрама имеют округлую форму, между ними больший объем занят раствором Ni–Fe; структура ВНЖ 95 более плотноупакованная, частицы имеют форму многоугольников, прослойки Ni–Fe между ними тонкие.

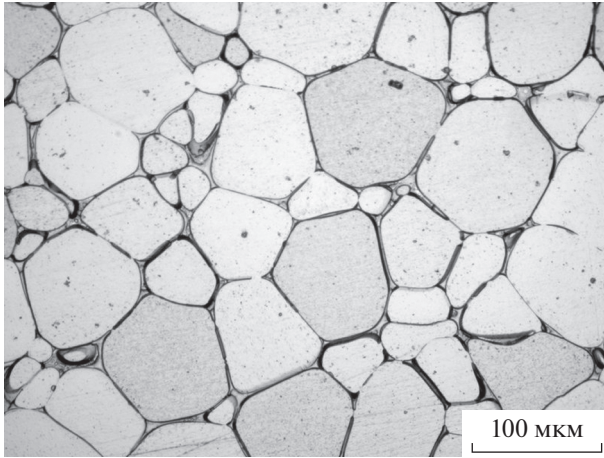


Рис. 3. Структура сплава ВЖ 95 в исходном состоянии.

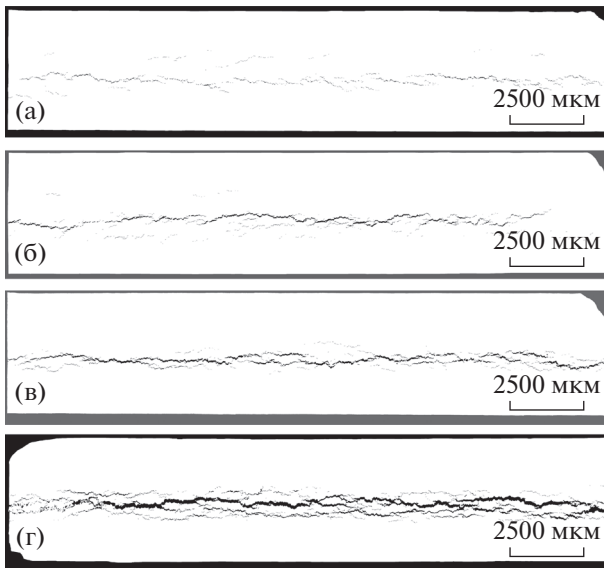


Рис. 4. Фотографии поперечного среза образцов из сплава ВЖ 90: а – $W_{уд} = 134$ м/с, б – $W_{уд} = 139$ м/с, в – $W_{уд} = 145$ м/с, г – $W_{уд} = 172$ м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сплав ВЖ 90. С образцами из сплава ВЖ 90 было проведено четыре опыта, в которых скорость соударения ударника и экрана составляла: $W_{уд} = 134, 139, 145, 172$ м/с (соответственно в образцах создавались напряжения σ_x в диапазоне от ~2.8 до 3.9 ГПа) [2].

На рис. 4 приведены фотографии поперечных срезов образцов, на которых видно, что степень их откольного разрушения возрастает с увеличением скорости нагружения. Зарегистрированы различные стадии откольного разрушения: зарождение микротрещин при $W_{уд} = 134$ м/с, стадия

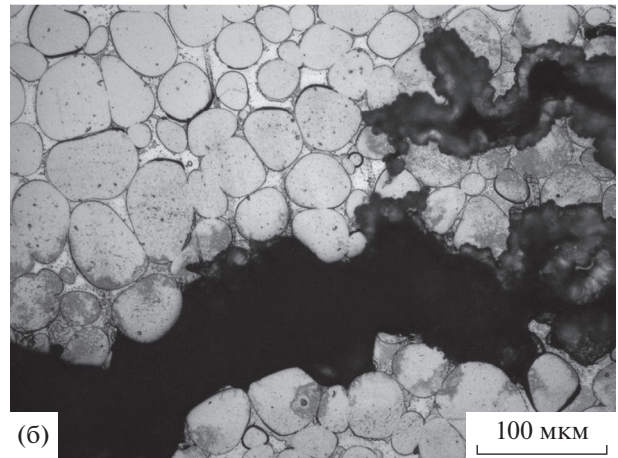
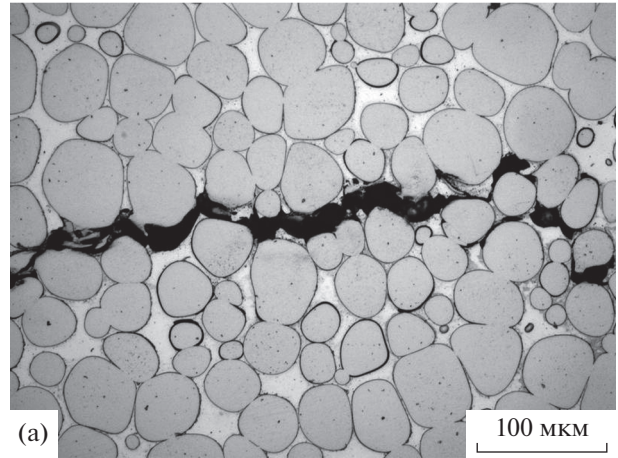


Рис. 5. Микроструктура сплава ВЖ 90 после нагружения образцов со скоростями: а – $W_{уд} = 134$ м/с, б – $W_{уд} = 172$ м/с.

роста трещин при $W_{уд} = 139$ и 145 м/с и образование магистральной трещины при скорости соударения $W_{уд} = 172$ м/с.

Исследование поперечных срезов испытанных образцов при большем увеличении (на рис. 5 приведена микроструктура сплава ВЖ 90 после проведения опытов по ударному нагружению образцов со скоростями $W_{уд} = 134$ и 172 м/с) показало, что трещины формируются и разрастаются в области γ -твердого раствора Ni–Fe, не затрагивая частицы вольфрама. При этом частицы вольфрама не деформировались, сохранили свои размеры и форму.

Сжатие образцов сплава ВЖ 90 до конечных значений деформаций $\epsilon_k \sim 20\%$ и $\epsilon_k \sim 75\%$, проведенное соответственно на испытательных прессах (скорость деформации $d\epsilon/dt \sim 0.15$ с⁻¹) и составных стержнях Гопкинсона ($d\epsilon/dt \sim 5250$ с⁻¹), показало, что форма частиц вольфрама изменилась: они вытянулись в направлении, перпендикулярном направлению приложения нагрузки (рис. 6).

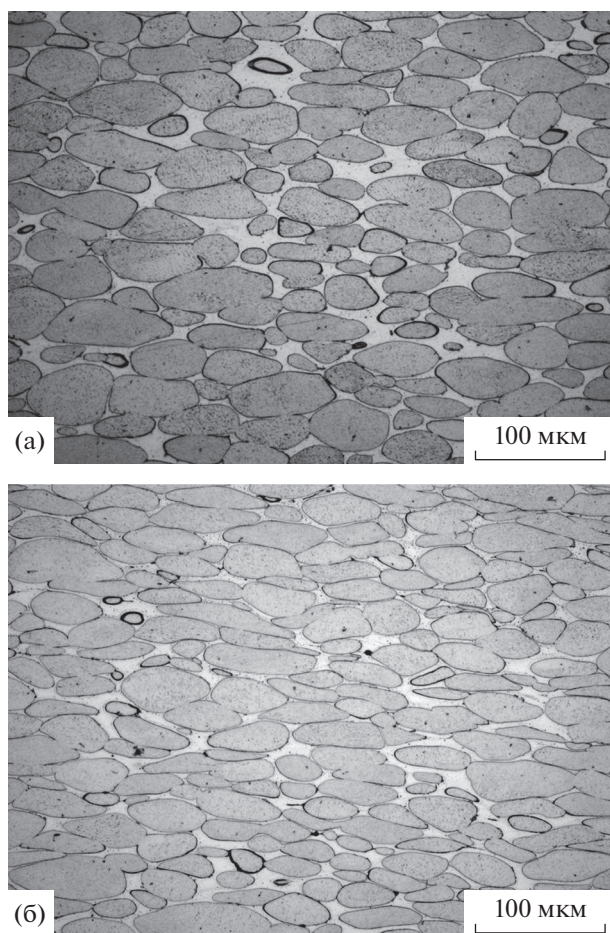


Рис. 6. Структура сплава ВНЖ 90 после опытов на сжатие: а – $d\varepsilon/dt \sim 0.15 \text{ с}^{-1}$, $\varepsilon_k \sim 20\%$, б – $d\varepsilon/dt \sim 5250 \text{ с}^{-1}$, $\varepsilon_k \sim 75\%$.

Различие в форме частиц W при ударно-волновом нагружении и при сжатии, возможно, связано не только с величиной конечной деформации ε_k , которая при ударном нагружении составляет несколько процентов, но и со скоростью деформирования (при ударно-волновом нагружении – $d\varepsilon/dt \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$).

Сплав ВНЖ 95

Эксперименты с образцами из сплава ВНЖ 95 проводили также по схеме, представленной на рис. 1. Подлетная скорость ударника в этих опытах составляла: $W_{уд} = 170, 182, 199 \text{ м/с}$ (σ_x от ~ 3.8 до 4.8 ГПа). На рис. 7 приведены фотографии поперечных сечений образцов.

Как и в опытах со сплавом ВНЖ 90, в образцах из ВНЖ 95 поврежденность возрастает с увеличением скорости соударения, трещины формируются и разрастаются в области γ -твердого раствора Ni–Fe, как это показано для опыта с $W_{уд} = 199 \text{ м/с}$ на рис. 8.

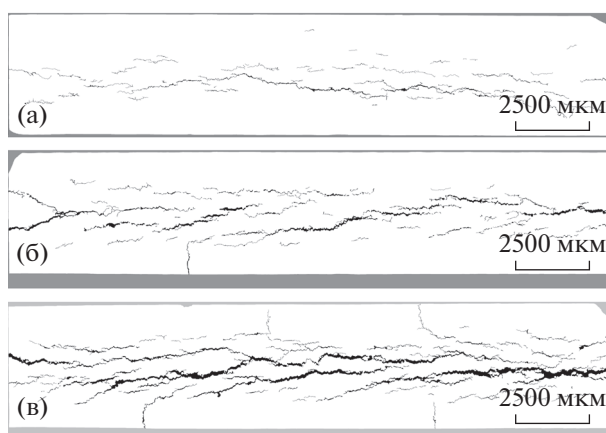


Рис. 7. Фотографии поперечного среза образцов из сплава ВНЖ 95: а – $W_{уд} = 170 \text{ м/с}$, б – $W_{уд} = 182 \text{ м/с}$, в – $W_{уд} = 199 \text{ м/с}$.

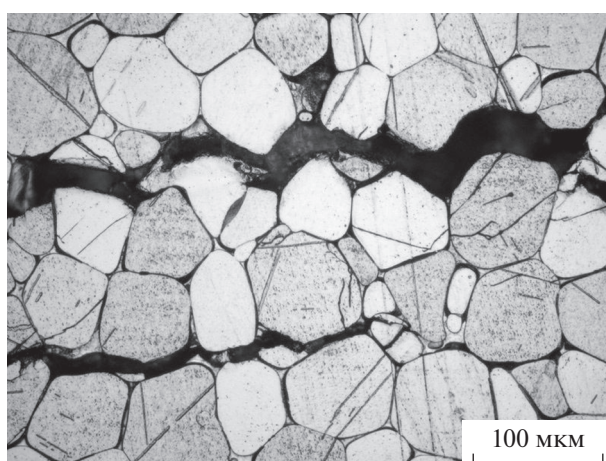


Рис. 8. Структура сплава ВНЖ 95 в области откольной трещины после ударного нагружения со скоростью $W_{уд} = 199 \text{ м/с}$.

Так как в сплавах ВНЖ, рассмотренных в настоящей работе, откольное разрушение происходит в растворе Ni–Fe, то этим можно объяснить различие в значениях откольной прочности сплавов и хрупкого вольфрама [1–3].

Сравнение рис. 4г и 7а показывает, что при одной скорости разгона ударника степень поврежденности в сплаве ВНЖ90 выше, чем в сплаве ВНЖ95. Однако в ВНЖ 95, в отличие от ВНЖ 90, трещины разветвляются в более широкой срединной зоне образца, а при увеличении изображений поперечных срезов во всех образцах были обнаружены линейные дефекты в самих вольфрамовых частицах (см., напр, рис. 9, $W_{уд} = 170 \text{ м/с}$), которые представляют собой полосы, пересекающие частицы вольфрама. Эти дефекты явно связаны с кристаллографической ориентировкой частиц. Подобные линейные дефекты ранее были

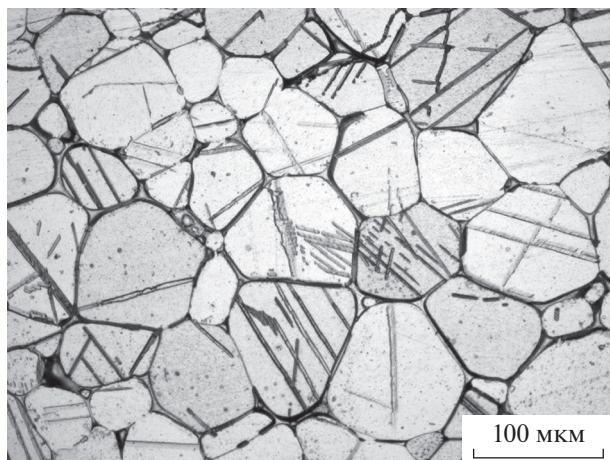


Рис. 9. Линейные дефекты в образце сплава ВНЖ 95 (зона съемки на расстоянии ~ 0.5 мм от поверхности соударения) после ударного нагружения со скоростью $W_{\text{уд}} = 170$ м/с.

выявлены в некоторых других металлах, в частности, в меди [9, 10].

По методике, предложенной ранее для измерения концентрации полос в меди по соотношению количества зерен, содержащих полосы, к общему количеству зерен [9], было проведено измерение концентрации линейных дефектов в образцах сплава ВНЖ 95 после нагружения. Результаты измерения приведены на рис. 10, измерение проводили по всему диаметру образца.

Линейные дефекты наблюдаются практически во всем объеме образцов, при этом наибольшее их количество во всех трех образцах находится вблизи поверхности соударения. При удалении от поверхности удара их концентрация монотонно падает. Максимальное количество дефектов зафиксировано в образце, при нагружении которого скорость ударника была наибольшей $W_{\text{уд}} = 199$ м/с. При этом надо отметить, что в сплаве ВНЖ 90 линейные дефекты отсутствуют и это, судя по всему, связано с большим количеством в этом сплаве менее плотного, чем вольфрам, γ -твердого раствора Ni–Fe.

Можно отметить, что наличие в срединной части образцов откольной поврежденности не влияет на ход зависимости концентрации линейных дефектов от глубины (отсутствуют особенности на кривых в области трещин на глубине ~ 2 мм). Из этого следует вывод, что дефекты в частицах вольфрама сформировались во время движения по образцу ударной волны еще до прихода волн разгрузки, а наибольшая их концентрация вблизи поверхности нагружения, возможно, связана с ее шероховатостью, с наличием на ней структурных неоднородностей и высоких градиентов напряжений.

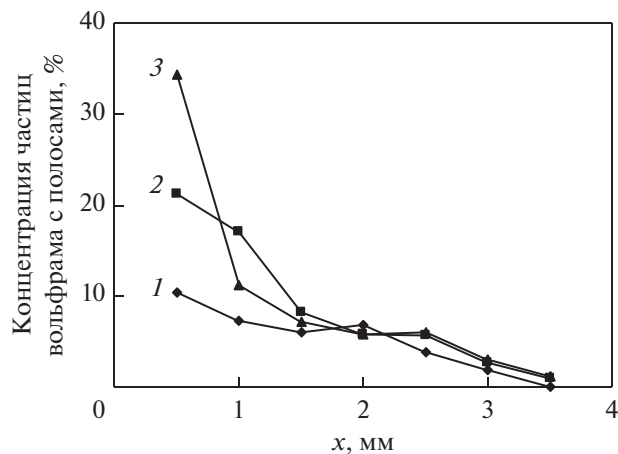


Рис. 10. Зависимость концентрации частиц, содержащих линейные дефекты, от расстояния (начало координат соответствует поверхности нагружения): 1 – $W_{\text{уд}} = 170$ м/с, 2 – $W_{\text{уд}} = 182$ м/с, 3 – $W_{\text{уд}} = 199$ м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена серия экспериментов по ударно-волновому нагружению и откольному разрушению сплавов ВНЖ с различным содержанием основного элемента – вольфрама. Показано, что разрушение сплавов ВНЖ 90 и ВНЖ 95 происходит по γ -твердому раствору Ni–Fe и не затрагивает частиц вольфрама. Однако при сжатии образцов в ударной волне в сплаве с большим содержанием вольфрама (ВНЖ 95) были обнаружены линейные дефекты, которые пересекают частицы вольфрама и имеют, предположительно, двойниковую природу. Определение концентрации полос в образцах сплава ВНЖ 95 показало, что наибольшее их количество во всех образцах наблюдается вблизи поверхности соударения, при этом они есть практически во всем объеме, и их концентрация монотонно падает при удалении от поверхности удара.

При нагружении в практически одинаковых условиях ширина зоны откольной поврежденности в ВНЖ 95 заметно больше, чем в ВНЖ 90.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огородников В.А., Лучинин В.И., Тюнькин Е.С., Григорьев В.А., Цой А.П., Хохлов А.А. О поведении композитных материалов при высокоскоростном растяжении (отколе) // Химическая физика. 1993. Т. 12. № 2. С. 178–179.
2. Трунин И.Р., Терешкина И.А., Подурец А.М., Симанов 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.

3. *Asay J.R., Chhabildas L.C.* Shear strength of shock-loaded polycrystalline tungsten // *J. Appl. Phys.* 1980. V. 51. № 9. P. 4774–4783.
4. *Савицкий Е.М., Поваров К.Б., Макаров П.В.* Металлургия вольфрама. М.: Металлургия, 1978. С. 204.
5. *Поварова К.Б., Макаров П.В., Ратнер А.Д., Заварзина Е.К., Волков К.В.* Тяжелые сплавы типа ВНЖ-90. I. Влияние легирования и режимов получения порошков вольфрама на их строение, микроструктуру и свойства спеченных сплавов // *Металлы.* 2002. № 4. С. 39–48.
6. *Chuvil-deev V.N., Panov D.V., Boldin M.S., Nokhrin A.V., Blagoveshensky Yu.V., Sakharov N.V., Shotin S.V., Kotkov D.N.* Structure and properties of advanced materials obtained by spark plasma sintering // *Acta Astronautica.* 2015. V. 109. P. 172–176.
7. *Брагов А.М., Чувильдеев В.Н., Мелехин Н.В., Филиппов А.Р., Константинов А.Ю., Сахаров Н.В.* Динамическая прочность тяжелого сплава ВНЖ-90, полученного методом электро-импульсного плазменного спекания // *Физическая мезомеханика.* 2018. Т. 21. № 2. С. 96–102.
8. *Чувильдеев В.Н., Москвичева А.В., Нохрин А.В., Баранов Г.В., Благовещенский Ю.В., Котков Д.Н., Лопатин Ю.Г., Белов В.Ю.* Сверхпрочные нанодисперсные вольфрамовые псевдосплавы, полученные методами высокоэнергетической механоактивации и электроимпульсного плазменного спекания // *ДАН.* 2011. Т. 436. № 4. С. 478–482.
9. *Подурец А.М., Раевский В.А., Ханжин В.Г., Лебедев А.И., Апрельков О.Н., Игонин В.В., Кондрохина И.Н., Баландина А.Н., Ткаченко М.И., Пети Ж.Ж., Зохер М.Э.* Двойниковые структуры в меди после ударного и безударного высокоскоростного нагружения // *ФГВ.* 2011. Т. 47. № 5. С. 123–131.
10. *Добромыслов А.В., Талуц Н.И.* Деформационное поведение монокристалла меди в условиях нагружения сферически сходящимися ударными волнами // *ФММ.* 2018. Т. 119. № 10. С. 1079–1088.