УДК 539.432 + 539.389.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МИКРОСТРУКТУРУ МАТЕРИАЛА МАРКИ М1

А.В. ГУСЬКОВ, канд. техн. наук, доцент
Н.О. ДРАНЬКОВ, студент
К.Е. МИЛЕВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент
(*НГТУ, г. Новосибирск*)

Статья поступила 10 октября 2012 года

Драньков Н.О. – 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, e-mail: nikitadrankov@gmail.com

Рассмотрено влияние способа обработки, состоящего из прокатки, ударно-волнового и комбинированного нагружения, на механические характеристики материала М1 и микроструктуру с графическим представлением связей между механическими характеристиками и микротвердостью.

Ключевые слова: материал М1, предел прочности, предел текучести, ударно-волновое нагружение, прокатка, комбинированное нагружение.

Введение

Способы обработки металлов давлением можно разделить на низкоскоростные (прокатка, осадка и т. д.) и высокоскоростные. Соответственно, когда скорость деформации меньше скорости звука в данном материале, – это низкоскоростная обработка, а когда скорость деформации больше скорости звука в обрабатываемом материале, – это высокоскоростная обработка. Оба способа влияют на изменение механических свойств материала и для их определения используют испытание на растяжение, при котором до начала образования шейки создается линейное напряженно-деформированное состояние. Данная методика требует вырезки образцов из изделий и относится к разрушающему методу контроля. Существуют и неразрушающие методы контроля, один из которых – измерение твердости, для которого экспериментально получена зависимость между характеристиками прочности и твердостью [1]:

$$\sigma = k(HB), \qquad (1)$$

где k – корреляционный коэффициент, зависящий от марки стали, HB – твердость. Используя данную зависимость, можно определить значения предела прочности $\sigma_в$ и предела текучести $\sigma_т$, не изготовляя и не испытывая на разрыв образцы из данного материала. При этом следует учитывать, что при низкоскоростном упрочнении изменение механических характеристик происходит за счет активной деформации зерен, а при высокоскоростном упрочнении изменения незначительны, так как все процессы протекают внутри зерна [2] .

Цель данных экспериментальных исследований – установление зависимостей предела текучести и предела прочности от микротвердости H_V для процесса прокатки, взрывной обработки, а также комбинированной обработки (прокатка + ударно-волновое нагружение (УВ), УВ + прокатка) и установления соответствия между полученными значениями механических характеристик при одинаковых значениях микротвердости, полученной разными способами обработки. Так как данные зависимости известны для низкоскоростных способов обработки, то основное внимание при определении значений $\sigma_в$ и $\sigma_т$ уделялось высокоскоростному упрочнению.

Материал и методика эксперимента

В качестве материала для исследования выбран модельный пластичный материал – листовая медь марки М1 в состоянии поставки. Для

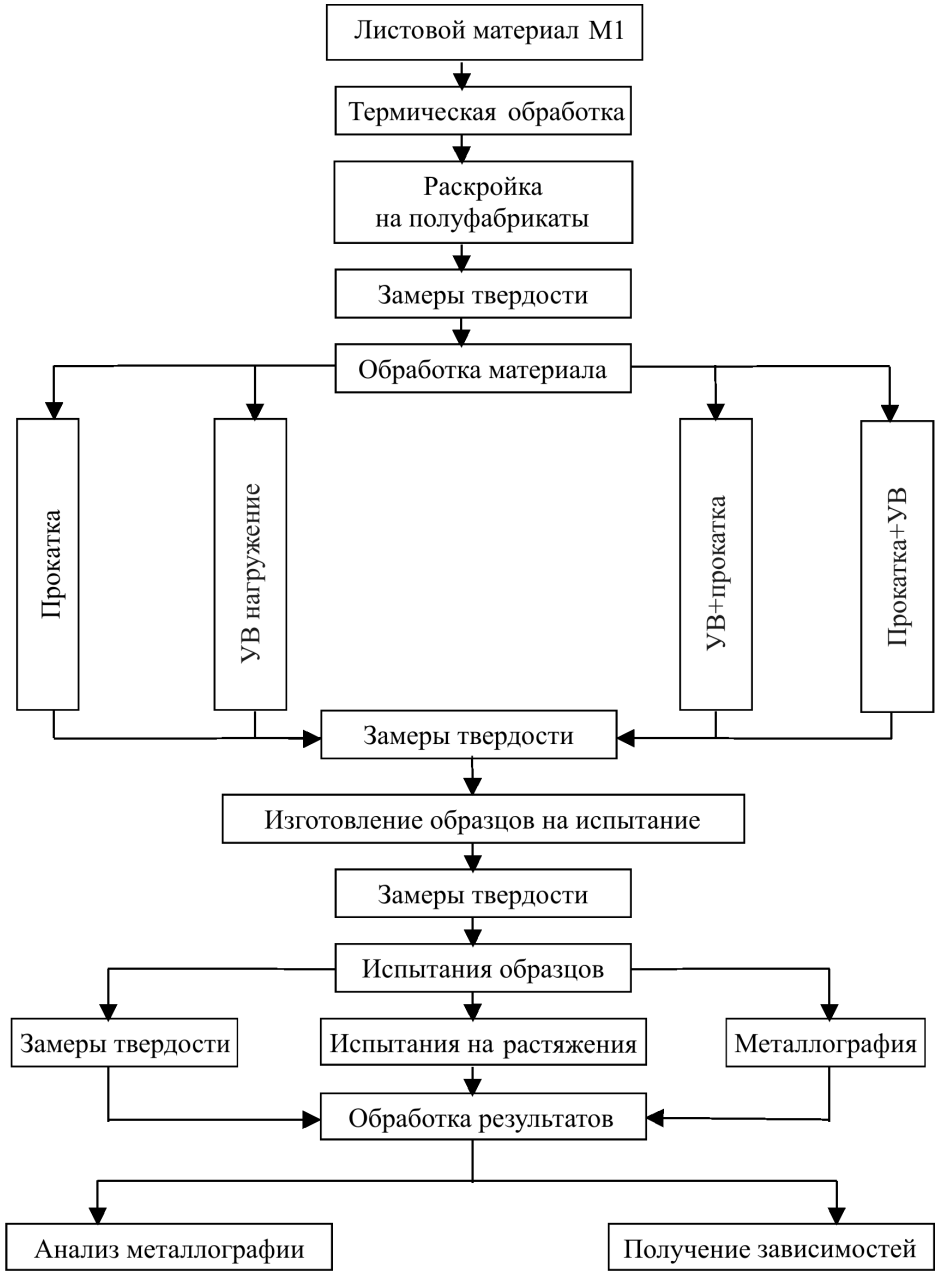


Рис. 1. Методика проведения эксперимента

определения зависимостей $H_V = f(\sigma_в)$ и $H_V = f(\sigma_т)$ нами предложена методика проведения эксперимента (рис. 1). Исходный лист подвергался термической обработке с целью снятия внутренних напряжений после предварительной обработки для восстановления изотропных свойств материала. В дальнейшем лист раскраивался на полосы. На каждой полосе проведены замеры твердости (по краям и в центре). Результаты замеров подтвердили, что значения твердости у всех пластин одинаковы. Далее, для проведения нагружения различными способами (прокатка, УВ нагружением и комбинированное нагружение), полосы раскраивались на полуфабрикаты в виде брусков с размерами 20×10×100 (мм), которым были присвоены числовые обозначения.

Прокатка. Для обработки прокаткой (рис. 2, *а*) использовались подготовленные полуфабрикаты под номерами 1–3, 6–9, 13, 15–18. При прокатке деформация определяется по формуле

$$\varepsilon = [(h_0 - h_1)/h_0]100\ \%, \qquad (2)$$

где h_0 – номинальная высота; h_1 – конечная высота.

Задаваясь рядом степеней деформации 10, 20, 30, 40, 50, 65, 75, 85, 90 %, по формуле (2) определялась величина h_1, и до этой величины происходила раскатка образцов [3]. Полученные

Таблица 1

Результаты прокатки

Номер заготовки	1, 7	2, 3	4, 13	8	6	9	17	15	16	18
ε, %	0	10	20	30	40	50	65	75	85	90
h_1	8,9	8,0	7,1	6,2	5,3	4,5	3,0	2,2	1,3	0,89

данные о степенях деформации и номерах полуфабрикатов представлены в табл. 1.

Степень деформации ε, равная 10 %, достигалась за один проход, остальные степени деформации были получены после многократных прокаток (например, ε = 65 % – за 16 проходов, ε = = 90 % – за 24 прохода). После этого на прокатанных заготовках были сделаны замеры твердости HB и HRB (табл. 2). Также от каждого прутка были отрезаны образцы для изготовления микрошлифов.

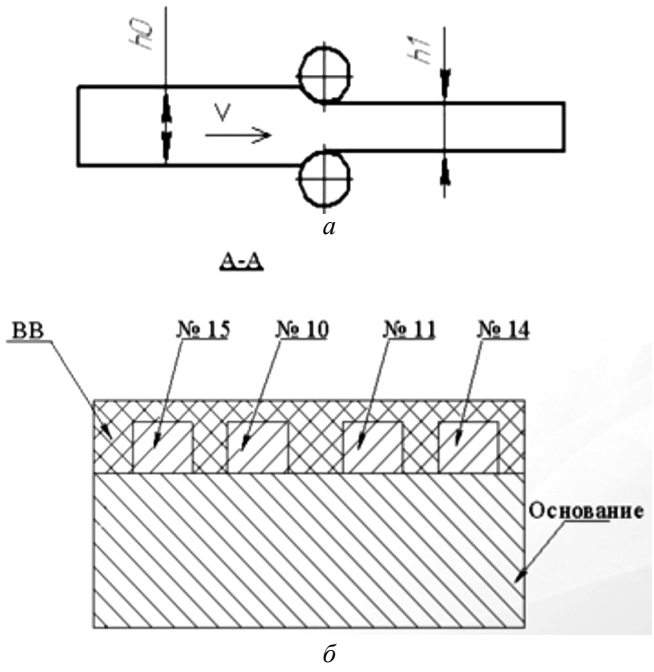


Рис. 2. Схема обработки:
а – прокатка; *б* – ударно-волновое нагружение

Ударно-волновое нагружение. Для обработки ударно-волновым способом (рис. 2, *б*) использовались четыре заготовки: заготовки № 5, 10 обрабатывались с давлением 10 ГПа и использованием гексогена, а № 11, 14 – с давлением 6 ГПа и использованием аммонита 6ЖВ; заготовки были закреплены винтами на стальной подложке толщиной 40 мм. Так как использовались насыпные взрывчатые вещества (ВВ) с ρ = 1,0 г/см^3, то была сделана картонная коробка по периметру подложки с таким условием, чтобы ее высота была на 10 мм выше уровня заготовок. Расположение прутков и ВВ обеспечивало отсутствие растекания материала. Полученная сборка заполнялась ВВ на высоту 10 мм над уровнем прутков. Вся сборка собиралась на столе во взрывной камере. Далее к готовой сборке подсоединялся детонирующий шнур с высоковольтным детонатором, и производился подрыв.

Комбинированое нагружение

а) Ударно-волновое нагружение + прокатка.

Обработанные взрывом образцы № 10 и 11 в дальнейшем подвергались прокатке со степенью деформации ε, равной 10 и 20 % соответственно.

б) Прокатка + ударно-волновое нагружение.

Подвергалась прокатанная заготовка со степенью деформации ε, равной 20 %, полученной прокаткой (отрезанная от заготовки № 4; далее ее номер – № 12).

В дальнейшем на всех образцах была замерена твердость (табл. 2).

Проведение механических испытаний. Для проведения механических испытаний на установке Р-5 из всех заготовок (исходных, прокатанных, обработанных УВ) изготавливались

Таблица 2

Результаты замеров твердости после нагружения

Вид обработки	Отжиг	ε = 10 %	ε = 20 %	ε = 30 %	ε = 40 %	ε = 50 %	ε = 65 %	ε = 75 %	ε = 85 %	ε = 90 %
Номер заготовки	1 и 7	2 и 3	4 и 13	8	6	9	01	15	16	18
HB	46	76	83	89	92	95	100	106	110	–

	УВ нагружение		Комбинированное нагружение		
Вид обработки	*P* = 10 ГПа	*P* = 6 ГПа	ε = 20 % + *P* = = 10 ГПа	*P* = 10 ГПа + + ε = 10 %	*P* = 6 ГПа + + ε = 20 %
Номер заготовки	5	14	12	10	11
HB	81	74	87	85	92

Таблица 3

Результаты замеров микротвердости

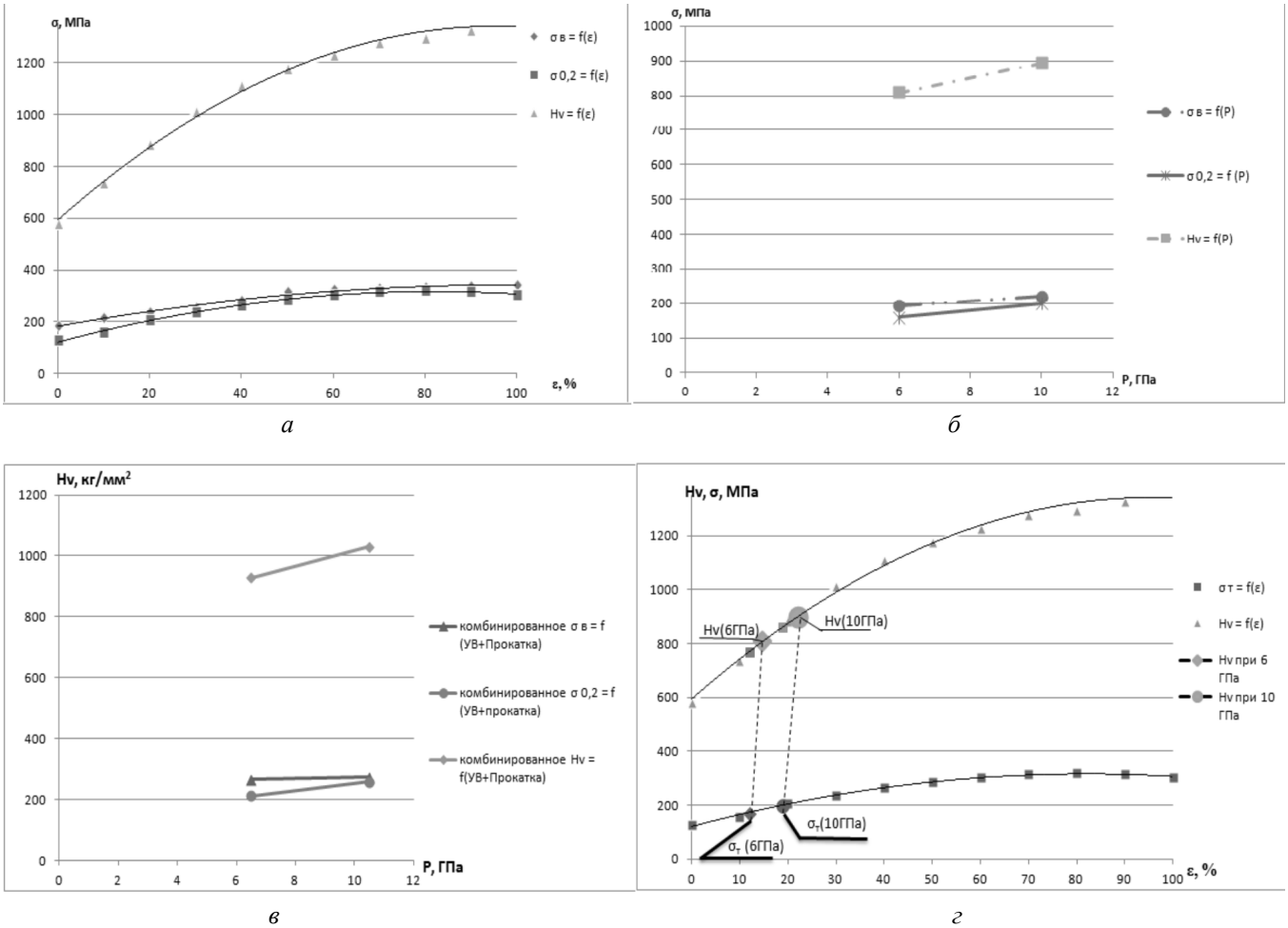
Вид обработки		Прокатка								
ε, %	Отжиг	ε = 10 %	ε = 20 %	ε = 30 %	ε = 40 %	ε = 50 %	ε = 65 %	ε = 75 %	ε = 85 %	ε = 90 %
Номер заготовки	7	3	13	8	6	9	01	15	16	18
H_V, МПа	518,42	776,16	888,86	1019,2	1150,52	1151,5	1189,72	1250,48	1252,44	1274

	УВ нагружение		Комбинированное нагружение		
Вид обработки	P = 10 ГПа	P = 6 ГПа	ε = 20 % + P =10 ГПа	P = 10 ГПа + ε = 10 %	P = 6 ГПа + ε = 20 %
Номер заготовки	5	14	12	10	11
H_V, МПа	892,78	808,5	1065,26	928,06	1029

образцы согласно ГОСТ 1497 по 6 штук на каждый вид обработки. Испытания на разрыв производились на двух скоростях нагружения: 0,86 и 0,14 мм/с. На основе обработки результатов построены экспериментальные зависимости: $\sigma_т = f(\varepsilon)$ и $\sigma_в = f(\varepsilon)$ (рис. 3, *а*).

Металлографический анализ

Микротвердость измерялась на предварительно подготовленных и протравленных микрошлифах. Измерение проводились с шагом 300...400 мкм. Результаты измерения микротвердости представлены в табл. 3. Также был



а *б*

в *г*

Рис. 3. Графики зависимостей:

а – предела прочности, предела текучести и микротвердости от степени деформации при прокатке; *б* – предела прочности, предела текучести и микротвердости от величины давления при ударно-волновом нагружении; *в* – предела прочности, предела текучести и микротвердости от величины давления и степени деформации при комбинированном нагружении; *г* – сравнение величины микротвердости при прокатке и УВ нагружении

проведен металлографический анализ структуры материла с использованием микроскопа «Неофот – 21».

Обсуждение результатов

Результаты механических испытаний на растяжение показали, что при прокатке отожженного материала до степени деформации 10 % резко возрастает предел текучести $\sigma_т$ (почти в два раза), в то время как предел прочности $\sigma_в$ увеличивается только на 13 %.

При УВ нагружении предел текучести $\sigma_т$ возрастает на 70 %, а предел прочности $\sigma_в$ – на 11 % по сравнению с отожженным образцом. При сравнении механических характеристик после комбинированного нагружения с характеристиками отожженного образца установлено, что $\sigma_т$ увеличивается на 120 %, а $\sigma_в$ – на 75 %.

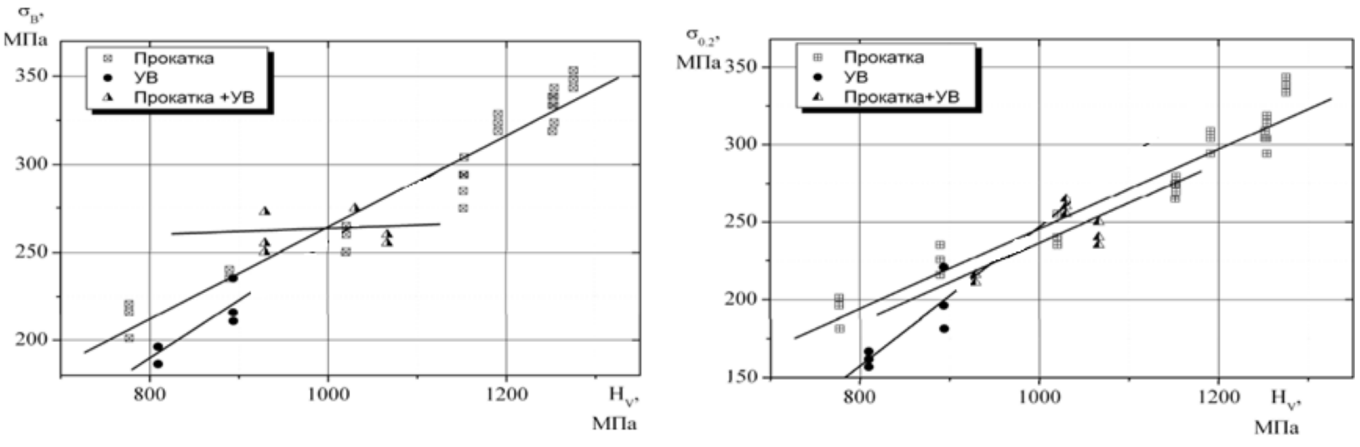
Область пластических деформаций при комбинированном нагружении уменьшилась. Разрушение образцов происходит при $\varepsilon = 0{,}12...0{,}15$. После прокатки до степени деформации $\varepsilon = 10$ % и УВ нагружения разрушение образцов происходит при $\varepsilon > 0{,}3$.

По данным результатов определены средние значения всех величин, по которым построены графики зависимости предела прочности, предела текучести и микротвердости от степени деформации при прокатке (рис. 3, *а*), величины давления при ударно-волновом нагружении (рис. 3, *б*), от величины давления и степени деформации при комбинированном нагружении (рис. 3, *в*). Так же был построен график сравнения микротвердости при прокатке и УВ нагружении (рис. 3, *г*).

На рис. 3, *г* представлены графики, на которых на кривую $\sigma_т = f(\varepsilon)$ для прокатки нанесены значения предела текучести $\sigma_т$ для УВ нагружения при 6 и 10 ГПа. Также на кривой $H_V = f(\varepsilon)$ для прокатки отмечены значения микротвердости H_V для УВ нагружения при 6 и 10 ГПа. При анализе данной зависимости видно, что значения $\sigma_т$ для УВ нагружения при 6 и 10 ГПа соответствуют значениям степени деформации при прокатке 12 и 18 %. При этих значениях степени деформации значения микротвердости равны 770 и 860 МПа соответственно. Однако при нанесении на кривую $H_V = f(\varepsilon)$ для прокатки значений микротвердости H_V для УВ нагружения получаем, что значения микротвердости при прокатке отличаются от значений микротвердости при УВ нагружении и равны 810 и 900 МПа соответственно. Таким образом, в случае оценки предела текучести $\sigma_т$ или предела прочности $\sigma_в$ материала после УВ нагружения по зависимости $\sigma_т = f(H_V)$ мы будем занижать значение микротвердости после прокатки.

Так же построены зависимости между пределом прочности и микротвердостью (рис. 4, *а*) и пределом текучести и микротвердостью (рис. 4, *б*).

Анализ графиков показал, что прямые имеют разные углы наклона, а следовательно, имеют разные зависимости. Это говорит о том, что при УВ нагружении мы получаем микротвердость



а *б*

Рис. 4. Графики зависимостей:

а – предела прочности от микротвердости; *б* – предела текучести от микротвердости

материала выше, а степень его деформации меньше. Следовательно, после УВ нагружения, у материала остается большой запас по пластичности.

Анализ микроструктуры материала

Образцы для исследования микроструктуры материала изготавливались параллельно с образцами для динамических испытаний из того же исходного материала. При анализе микроструктуры исследуемого материала было замечено, что при степени деформации ε, равной 30 %, происходит практически полный разворот зерен в направлении прокатки. До 30 % деформации зерна практически не деформируются и по своим размерам близки к исходным (рис. 5). В дальнейшем происходит накопление деформации вдоль прокатки, изменение формы зерен, образование текстуры [4].

При сравнении структуры исходного и обработанного взрывом материала с давлением 10 и 6 ГПа (рис. 6) изменения в структуре при оптическом увеличении незаметны. Размеры и форма зерна сохраняются. Аналогичная картина нами наблюдалась и при исследовании стали Гадфильда, что подчеркивает наличие общих закономерностей деформирования у разных материалов [5].

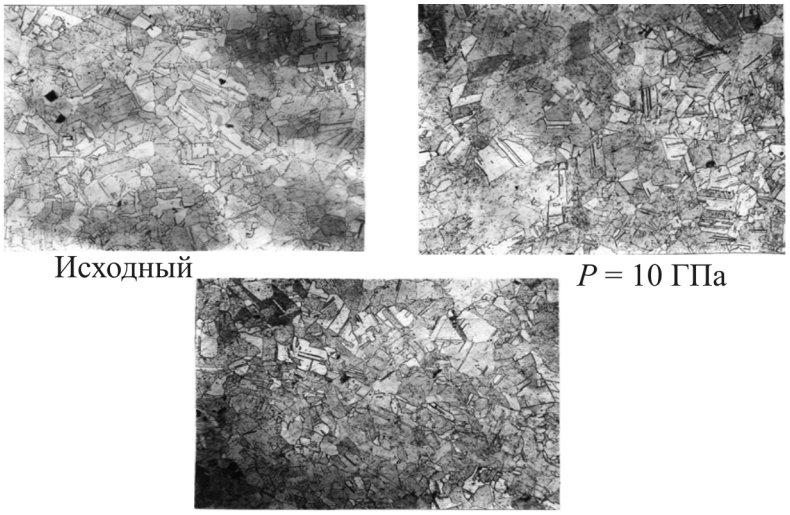


Рис. 6. Анализ микроструктуры после УВ нагружения

Микроструктура материала, деформированного с ε = 20 %, почти не отличается от структуры материала, обработанного УВ с P = 10 ГПа предварительно деформированного на такую же величину.

У материала со степенью деформации 20 % заметен лишь разворот зерен без их изменения, а у обработанного УВ с давление 6 ГПа и затем прокатанного с ε = 20 % наблюдается не столько разворот зерен, сколько их изменение (рис. 7).

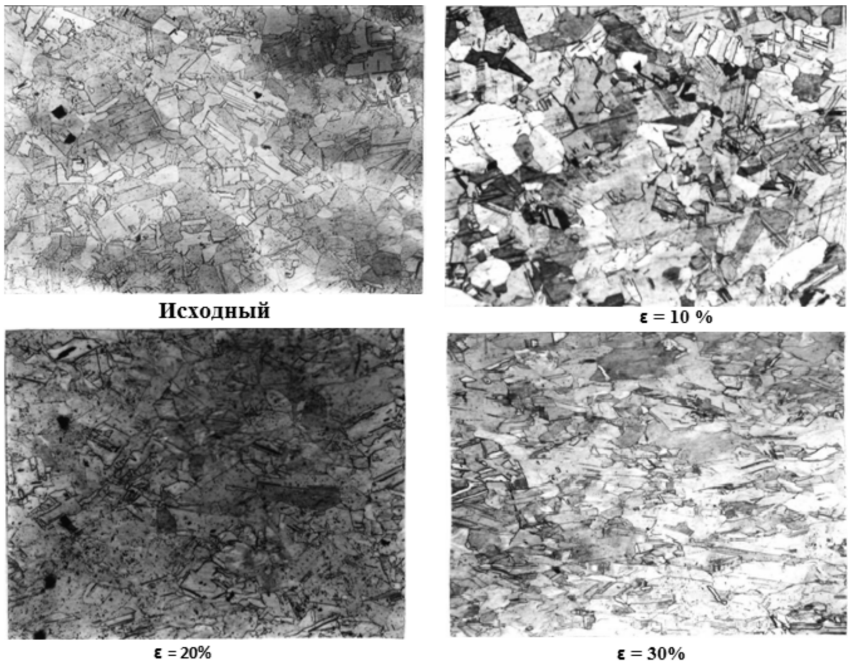
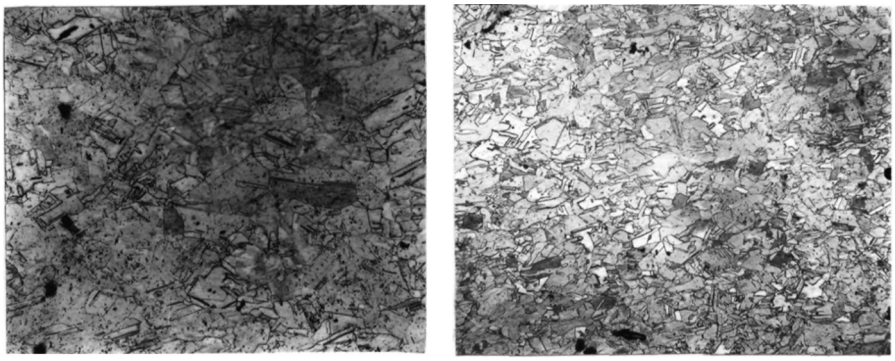


Рис. 5. Анализ микроструктуры после прокатки

При сравнении структуры материала со степенью деформации 10 % и материала, обработанного взрывом с давлением P = 10 ГПа, а затем прокатанного на 10 %, разница не обнаруживается.

Следовательно, можно сделать вывод, что обработка ударными волнами не изменяет или очень мало изменяет структуру материала, наблюдаемую в оптический микроскоп. Но вместе с этим существует увеличение прочности, твердости, следовательно, по структуре материала, обработанного ударными волнами, не всегда можно судить об его упрочнении.



ε = 20 % ε = 20 % + P = 10 ГПа

Рис. 7. Сравнение структуры материала после прокатки и комбинированного нагружения

Выводы

1. При одном и том же пределе текучести $\sigma_{0,2}$ материала М1 после УВ нагружении и прокатки идет несоответствие значений микротвердости H_V, т. е. после УВ нагружения H_V = 900 МПа, а после прокатки H_V = 860 МПа. Так как разница невелика, то этим можно пренебречь.

2. При УВ нагружении структура материала мало изменяется, т. е. не происходит активной деформации зерен и они сохраняют свою геометрическую форму. На основании этого можно сделать вывод, что материал сохраняет характеристики пластичности, и при дальнейшем деформировании значения микротвердости могут увеличиваться.

3. После упрочнения материала его структура отличается – при прокатке имеет место изменение формы зерен и ориентация их вдоль направления прокатки, а при УВ нагружении этого не наблюдается.

4. Результаты экспериментов хорошо аппроксимируются линейной зависимостью (прямыми) между механическими характеристиками и микротвердостью для каждого вида обработки. Полученные зависимости имеют разный угол наклона прямых, а значит, имеют разную интенсивность изменения предел прочности $\sigma_в$, предел текучести $\sigma_{0,2}$ от микротвердости H_V. Следовательно, коэффициент k из формулы (1) зависит от вида обработки.

Список литературы

1. *Давыденков Н.Н.* Избранные труды. В 2 т. Том 2. Механические свойства материалов и методы измерения деформаций. – Киев: Наукова думка, 1981. – 656 с.

2. *Дерибас А.А.* Физика упрочнения и сварка взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980.

3. *Воропаева М.В.* Исследование влияния прокатки со сдвигом на структуру, свойства и термическую стабильность меди М1 / М.В. Воропаева, В.В. Пашинский, Е.Г. Пашинская // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании. 2011». – Выпуск 4. Том 7. – Одесса: Черноморье, 2011. – 96 с.

4. *Столяров В.В., Пашинская Е.Г., Бейгельзимер Я.Е.* Влияние комбинированной деформации на структуру и свойства меди и титановых сплавов // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 10. – С. 19–23.

5. *Гуськов А.В., Драньков Н.О., Милевский К.Е.* Исследование механических свойств стали Гадфильда при высокоскоростном нагружении // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 3. – С. 39–41.

Research of influence of the way of processing on mechanical characteristics and microstructure of the material M1

A.V. Guskov, N.O. Drankov, K.E. Milevskiy

Influence of processing method (rolling, shock- wave and combined loading) on mechanical characteristics of metal M1 and microstructure, and deriving of the relation between $H_V = f(\sigma_в)$ and $H_V = f(\sigma_т)$ of the material depending on given types of processing are discussed.

Key words: material M1, tensile strength, yield strength, shock-wave loading, rolling, combined loading.