

ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОЕ ДВИЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ*Е.Г. Пашинская**Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, г. Донецк*

Проведен сравнительный анализ диссипации энергии при растяжении стали Ст3, полученной интенсивной пластической деформацией путем прокатки со сдвигом и стандартной прокатки. Показано, что общая удельная работа пластической деформации при растяжении образцов, подвергнутых прокатке со сдвигом, выше, чем для образцов, подвергнутых стандартной прокатке. Обнаруженные закономерности изменения энергетических параметров прокатки, температуры металла в калибре, удельной работы пластической деформации, плотности дефектов подтверждают протекание интенсифицированного движения дефектов при прокатке со сдвигом.

Ключевые слова: диссипация энергии, интенсивная пластическая деформация, прокатка со сдвигом, интенсифицированное движение дефектов.

Введение. Принято считать, что интенсивная пластическая деформация (ИПД) отличается от обычной деформации более высоким уровнем давления и активной сдвиговой деформацией. Это позволяет реализовать протекание нетипичных механизмов деформации чистых металлов и сплавов и получить нанокристаллическое состояние в них. До сих пор считалось, что основным механизмом, обеспечивающим образование нанозерен (структур), является зернограничное проскальзывание (ЗГП).

В настоящей работе показано, что ЗГП – не единственный реализованный при ИПД механизм: еще одним важнейшим механизмом является релаксационный процесс типа динамической рекристаллизации. Поэтому фрагментация зерен металлов и сплавов при ИПД сменяется двумя релаксационными процессами – ЗГП и динамической рекристаллизацией. В основе «быстрой» перестройки границ зерен от мало- до высокоугловых лежит эффект интенсифицированного движения дефектов, под которым следует понимать движение точечных, линейных и объемных дефектов. Именно этот эффект лежит также в основе наблюдаемых в ряде материалов явлений: ускоренной на n -порядков диффузии; высокой неравновесной плотности вакансий; снижения температуры в очаге деформации; снижения темпов деформационного упрочнения при росте степени деформации. Для наглядности эти данные в схематической форме отражены в табл. 1. Часть наблюдаемых явлений может объясняться развитием ЗГП (знак «+» в табл. 1) как процесса, конкурирующего с фрагментацией, в то время как остальные явления можно пояснить только с привлечением интенсифицированного движения дефектов (ИДД).

ИДД, согласно [1], может объясняться тем фактом, что сдвиговая деформация приводит к формированию дислокаций с преимущественным количеством винтовых компонент. Иными словами, схемы с использованием простого сдвига приводят к изменению количественного соотношения краевых и винтовых компонент дислокаций в сторону увеличения количества винтовых. Согласно [1], именно поведение винтовых дислокаций определяет поведение материала при высоких напряжениях, выше предела текучести, что объясняет наблюдаемые эффекты.

ИДД объясняет также особые свойства материалов, подвергнутых ИПД, при дальнейших деформационных и термических обработках. К необычным эффектам, проявляющимся в материалах после ИПД и последующей холодной деформационной обработки, относятся: повышение плотности; замедленное формирование анизотропии зерен и свойств; увеличение размера зерна при повышении прочности и пластичности; возможность деформировать материал до больших степеней деформации без отжига вследствие большого запаса пластичности σ_m/σ_e и др. К необычным эффектам, проявляющимся при термической обработке, относятся: увеличение скорости сфероидизации пластин избыточной фазы; изменение количественного соотношения фаз вследствие растворения избыточных фаз в твердом растворе; устойчивость зерненной структуры к рекристаллизации и вторичной рекристаллизации вследствие формирования равновесных границ.

Основной раздел. В этой статье не будем подвергать подробному анализу приведенные в табл. 1 факты (табл. 1, пункты 1–5), т.к. они достаточно широко и глубоко освещены в печати [2–4]. В свою очередь, рассмотрим обнаруженное сравнительно недавно явление, иллюстрирующее понятие ИДД (табл. 1, пункт 6).

Обнаружено, что разница между потребляемой двигателем валка мощностью при стандартной прокатке и прокатке со сдвигом составила 30 % [1]. Как известно, мощность прямо пропорционально связана с давлением на рабочий инструмент и накопленной деформацией. Поэтому увеличение потребляемой мощности при прокатке со сдвигом свидетельствует о большей деформации.

Таблица 1

Механизмы деформации при ИПД

№	Эффекты ИПД	Тип зависимости	Механизмы			
			Фрагментация	ЗГП	ИДД	
					Рекристаллизация	Сток дефектов
1	Изменение темпа: роста прочностных характеристик и снижения пластических характеристик		+	+	+	+
2	Снижение темпа деформационного упрочнения и уменьшения размера зерна и ОКР		+	+	+	-
3	Немонотонное изменение плотности (рост при развитой ИПД)		+	-	+	+
4	Снижение темпа роста плотности дислокаций		+	-	+	+
5	Отставание роста H_{μ} от σ_{ϵ}		+	-	-	+
6	$\sigma_m / \sigma_{\epsilon} < 0,8$ (условие пластичности) уменьшается при ИПД		+	+	+	+
7	Снижение температуры образца в очаге деформации при ИПД		+	-	-	+

Зафіксовано також, що при виконанні прокатки со сдвигом температура металла при проходженні калібру росте в 2.5 рази більше ($\Delta T \approx 50^\circ\text{C}$), ніж при стандартній прокатці ($\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$).

Крім того, змінення температури в стандартному калібрі описується класическою залежністю різкого підйому температури в момент попадання металла в калібр і її незмінністю при проходженні калібру. Цей момент супроводжується ростом сили току, споживаного двигателем валків, і падінням напруги, а також зниженням швидкості обертання прокатного валка.

В той же час для сдвигового калібру залежність носить принципово інший характер: сила току на першому етапі різко росте, а потім при проходженні металла по калібру падає. При цьому температура також різко зростає при входженні металла в калібр і зменшується на 10 % при подальшому його проходженні, що знаходиться за межами погрешності експерименту. Таке зниження температури в очагах деформації нетипичне явище, т.к. класическі схеми обробки металів тисненням звичайно призводять до розігріву металла в деформуючому пристрої [5].

Слідователно, більший приріст температури повинен призводити до більшому кількості теплоти, виділеної в сдвиговому калібрі, порівняно з звичайним. Але в тому випадку, якщо цього не відбувається, т.е. кількість виділеної теплоти Q в металі після обробки прокаткою со сдвигом менше, ніж при класическій прокатці, це може служити прямим доказом протікання ІДД.

Таким чином, слід зробити висновок про те, що якщо в матеріалі може здійснюватися активне переміщення дефектів, то удільна робота пластическої деформації буде витрачатися в основному на теплоту, т.к. частина потенціальної енергії переходить в кінетическую. Це означає, що в такому матеріалі (наприклад, в міді [1]) може здійснюватися структурізація дефектів вліть до утворення ними нових меж розділу типу мало- або високоуглових меж. Іншими словами говорячи, може спостерігатися протікання полігонізації і рекристалізації *in situ* в процесі деформації. Цей ефект неодноразово спостерігався різними авторами при деформації міді в районі кімнатних температур. При цьому схеми деформації [1–5] були різними (растяження, кручення, ПС, ВЭ, РКУП і др.).

В роботі G.I. Taylor і H. Quinney кількість теплоти, виділюючої в процесі деформування міді, становить 80–90 % від роботи, витраченої на деформування матеріалу [6]. В той же час результати, отримані E.A. Pieczyska, S.P. Gadał і W.K. Nowacki для отожженої нержавіючої сталі, показують, що виділена теплота становить 60–70 % від роботи пластическої деформації [7]. Якщо ж рух дефектів ускладнюється, як в тому випадку [7], то удільна робота деформації буде поглинатися за рахунок утворення нових дефектів. І, відповідно, в тому випадку удільна робота пластическої деформації буде менше дисипувати за рахунок виділення в вигляді теплоти (порівняти дані [6, 7]). Як видно, різниця може становити помітну величину більше 20 %.

Таким чином, можна передбачити, що в тому випадку реалізації в матеріалі ефекту ІДД кількість виділеної теплоти буде більше, ніж в тому випадку, коли структурізація матеріалу йде за класическою сценарієм збільшення густоти дефектів з ростом ступеня деформації. Тому кількість виділюючої теплоти буде визначатися, в першу чергу, рухливістю дефектів в матеріалі (їх кількістю і розташуванням), а, в другу чергу, пластическістю матеріалу. Тому, якщо порівнювати матеріали, що мають на початку різну пластическість (мідь-сталь), то очевидно, що кількість виділеної теплоти буде більше для міді, ніж для сталі. Інший питання: від чого буде залежати дисипація удільної роботи пластическої деформації в тому випадку, якщо досліджується один і той же матеріал, але деформувався він за різними режимами. Цьому питанню і присвячена стаття, що розглядає сталь СтЗпс після деформації прокаткою і подальшого розтягнення.

Відомо [8], що частина роботи в процесі пластическої деформації dA_p поглинається матеріалом, а друга розсіюється в вигляді теплоти dQ . Таким чином, поглинена енергія dE_s визначається як різниця між роботою пластическої деформації і кількістю теплоти, розсіяною в навколишнє середовище [8].

$$dA_p = dE_s + dQ. \quad (1)$$

Робота пластическої деформації звичайно визначається з діаграми розтягнення. Найчастіше [6, 8, 9] теплоту, виділюючі в процесі пластическої деформації, визначають тепловізіонним методом. В той же час, як видно з статей [6, 7], дослідники розходяться в оцінках поглиненої і розсіяної матеріалом енергії. В зв'язі з цим необхідно застосувати методику оцінки кількості теплоти, виділюючої в результаті термопластического ефекту, а також провести порівняльний аналіз змінення дисипації енергії для малоуглеродистих сталей в стані після традиційної прокатки і прокатки со сдвигом.

Таким чином, метою роботи є оцінка кількості теплоти, виділеної в процесі пластическої деформації в зразках малоуглеродистого сталі, отриманих прокаткою со сдвигом, а

также проведение сравнительного анализа диссипации энергии в этой стали, полученной стандартной прокаткой и прокаткой со сдвигом.

Материалы и методика. В настоящей работе исследуется низкоуглеродистая сталь Ст3 следующего химического состава: 0,17 % С, 0,2 % Si, 0,54 % Mn, 0,14 % Cr, 0,14 % Ni и 0,25 % Cu. Для проведения сравнительного анализа стали Ст3 в состоянии после прокатки по стандартному режиму (СТ) и прокатки со сдвигом (ПС) были изготовлены стандартные плоские образцы для испытаний на разрыв. Испытания на растяжение проводились с привлечением пластометра STD 810 фирмы VÄNR – Thermoanalyse GmbH при постоянной скорости деформирования, равной $1,67 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Термочувствительность системы составляет 0,3 К. Оценка поглощенной энергии выполнялась с использованием данных тепловизионных измерений по методике, предложенной в работах [7, 8].

Оценка поглощенной энергии. На рис. 1 приведена зависимость удельной работы пластической деформации A_p , поглощенной энергии E_s и выделившейся теплоты Q от относительного удлинения для упрочненной стали Ст3, подвергнутой СТ и ПС.

Абсолютные значения представленных величин для стали Ст3 при ПС и СТ существенно отличаются. Абсолютное значение энергии, поглощенной материалом после ПС, в сравнении с СТ-состоянием материала, больше в $\approx 2 \div 2,5$ раза. Сопоставление рисунков позволяет говорить о том, что предельная удельная работа пластической деформации (вплоть до разрушения образцов) для схем деформации ПС и СТ составляет 70 и 25 МДж/м³, кроме того относительная величина на единицу удлинения составила 1.8 и 1.1 МДж/м³ соответственно. Большее количество удельной работы пластической деформации для схемы ПС объясняется тем фактом, что образцы имеют больший уровень пластичности (табл. 2).

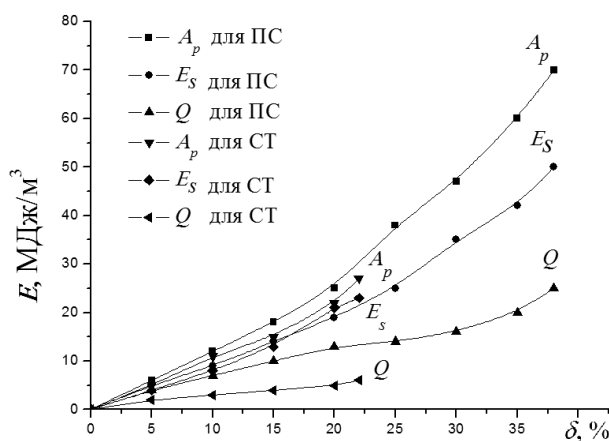


Рис. 1

Таблица 2

Механические свойства катанки из стали Ст.3 после прокатки по разным технологиям

Технология прокатки	Механические свойства		
	$\sigma_m, \text{ Н/мм}^2$	$\sigma_b, \text{ Н/мм}^2$	$\delta_5, \%$
ПС	298	404	38
СТ	280	373	22

Анализ зависимостей показал, что количество выделившейся в результате термопластического эффекта теплоты в образцах, прокатанных по схеме ПС, составляет $\approx 30 \%$ от работы пластической деформации. После ПС часть работы, поглощенной материалом, достигает 70 %. Для СТ-технологии количество теплоты, выделившейся в результате термопластического эффекта, составляет $\approx 10 \%$ от работы пластической деформации, остальные $\approx 90 \%$ поглощаются материалом.

Таким образом, процентное соотношение выделившейся теплоты Q для стали Ст3 после ПС существенно выше, чем в стали после СТ (90 % и 70 % соответственно). Это обстоятельство может служить прямым доказательством протекания ИДД, т.к. часть удельной работы деформации в стали после ПС идет на развитие ИДД, а затем кинетическая энергия дефектов переходит в теплоту. Замеры, произведенные во время выполнения прокатки со сдвигом, показали, что температура металла при прохождении калибра при ПС растет в 2.5 раза больше, чем при стандартной прокатке. Эксперименты показывают, что плотность дефектов в случае растяжения материала после ПС меньше, чем в случае СТ. Это действительно зафиксировано нами в эксперименте: плотность дефектов, измеренная рентгенографически, различается на несколько порядков (после прокатки ПС – 10^6 см^{-2} , после СТ – 10^{10} см^{-2}).

В то же время для стали СТ при растяжении удельная работа деформации в основном поглощается образцом за счет образования новых дефектов, но они перемещаются не так активно как для случая с ПС, и поэтому количество выделившейся теплоты в этом случае относительно ниже, чем для ПС. Плотность дефектов после растяжения составляет 10^{12} см^{-2} для обоих видов прокатки.

Выводы. Проведение сравнительного анализа диссипации энергии в стали Ст3, полученной стандартной прокаткой и прокаткой со сдвигом, показывает, что общая удельная работа пластической деформации в ходе прокатки со сдвигом выше.

Оценка количества теплоты, выделившейся в процессе растяжения в образцах малоуглеродистой стали, полученных прокаткой со сдвигом и прокаткой по стандартной технологии, показала, что удельная работа пластической деформации в образцах после ПС будет расходоваться в основном на теплоту. Это объясняется тем, что при прокатке со сдвигом часть энергии пластической деформации расходуется на активное перемещение дефектов.

Обнаруженные закономерности изменения энергетических параметров прокатки, температуры металла в калибре, плотности дефектов и удельной работы пластической деформации подтверждают протекание интенсифицированного движения дефектов при прокатке со сдвигом.

РЕЗЮМЕ

Проведено порівняльний аналіз дисипації енергії при розтягуванні сталі Ст3, отриманої інтенсивною пластичною деформацією шляхом прокатки зі зсувом і стандартної прокатки. Показано, що загальна питома робота пластичної деформації в ході прокатки зі зсувом вище, ніж при стандартній прокатці. Виявлені закономірності зміни енергетичних параметрів прокатки, температури металу в калібрі, питомої роботи пластичної деформації, щільності дефектів підтверджує протікання інтенсифікованого руху дефектів при прокатці зі зсувом.

Ключові слова: дисипація енергії, інтенсивна пластична деформація, прокатка зі зсувом, інтенсифікований рух дефектів.

SUMMARY

The comparative analysis of the energy dissipation in process of steel St3 samples tension, which was produced by intensive plastic deformation (rolling with shift) and standard rolling, was fulfilled. It was shown that general specific work of plastic deformation of samples after rolling with shift higher than after standard rolling. Revealed laws of changes of the energy parameters of rolling, temperature of metal in the rolling grooves, specific work of plastic deformation, density of defects confirm the development of intensified motion of defects during the rolling with shift.

Keywords: energy dissipation, intensive plastic deformation, rolling with shift, intensified motion of defects.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пашинская Е.Г. Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации / Е.Г. Пашинская. – Донецк: Вебер, 2009. – 352 с.
2. Интенсифицированное движение дефектов при больших пластических деформациях / Е.Г. Пашинская, Ю.Н. Подрезов, В.В. Столяров и др. // Физика и механика материалов. – 2012. – Т. 15. – С. 26-33.
3. Effect of rolling with shear technology on structure, properties and plasticity of low-carbon steel / E. Pashinska, V. Varyukhin, A. Zavdoveev, V. Stolyarov // Emerging Materials Research. – 2012. – Vol. 1. – P. 121-126.
4. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов: справочник / А.В. Бобылев. – Москва: Металлургия, 1987. – 208 с.
5. Taylor G.I. The latent energy remaining in a metal after cold working / G.I. Taylor, H. Quinney // Proc. Roy. Soc. – 1934. – Vol. CXLIII. – A. – P. 307-326.
6. Pieczyska E.A. Rate of energy storage during consecutive deformation of steel / E.A. Pieczyska, S.P. Gadaj, W.K. Nowacki // Quantitative infrared thermography 5, QIRT'2000, Proceedings of Eurotherm Seminar. – Reims, France, 2000. – No. 64. – P. 260-264.
7. Иванов А.М. Особенности диссипации энергии конструкционных сталей / А.М. Иванов, Е.С. Лукин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75, № 11. – С. 46-49.
8. Oliferuk W. Investigation of metal deformation using thermography / W. Oliferuk // Quantitative infrared thermography 4, QIRT'98, Proceedings of Eurotherm Seminar. – Lodz, Poland, 2000. – No 60. – P. 134-139.
9. Дегтярев М.В. Низкотемпературная рекристаллизация чистого железа, деформированного сдвигом под давлением / М.В. Дегтярев, Л.М. Воронова, Т.И. Чашухина // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т. 97, № 1. – С. 78-88.

Поступила в редакцию 28.03.2013 г.