

PACS: 61.66.-f, 62.20.-x

Е.Г. Пашинская¹, В.М. Ткаченко¹, А.В. Завдоев^{1,2}

ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ СТАЛИ Ст3, ПОЛУЧЕННОЙ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ ПУТЕМ ПРОКАТКИ СО СДВИГОМ

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины

²Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины

Статья поступила в редакцию 2 декабря 2015 года

Проведен сравнительный анализ диссипации энергии при растяжении стали Ст3, полученной интенсивной пластической деформацией (ИПД) путем прокатки со сдвигом (ПС) и стандартной прокатки (СТ). Показано, что общая удельная работа пластической деформации при растяжении образцов, подвергнутых ПС, выше, чем для образцов после СТ. Обнаруженные закономерности изменения энергетических параметров прокатки, температуры металла в калибре, удельной работы пластической деформации, плотности дефектов подтверждают различный характер пластической деформации при растяжении стали Ст3, полученной путем СТ и ПС.

Ключевые слова: диссипация энергии, интенсивная пластическая деформация, прокатка со сдвигом

Проведено порівняльний аналіз дисипації енергії при розтягуванні сталі Ст3, отриманої інтенсивною пластичною деформацією (ІПД) шляхом прокатки зі зсувом (ПЗ) і стандартної прокатки (СТ). Показано, що загальна питома робота пластичної деформації при розтягуванні зразків, отриманих ПЗ, вище, ніж для зразків після СТ. Виявлені закономірності зміни енергетичних параметрів прокатки, температури металу в калібрі, питомої роботи пластичної деформації, щільності дефектів підтверджують різний характер пластичної деформації при розтягуванні зразків сталі Ст3, отриманих СТ і ПЗ.

Ключові слова: дисипація енергії, інтенсивна пластична деформація, прокатка зі зсувом

1. Введение

Принято считать, что ИПД отличается от обычной деформации более высоким уровнем давления и является активной сдвиговой. Это позволяет реализовать протекание нетипичных механизмов деформации чистых металлов и сплавов и получить нанокристаллическое состояние в них. Достаточно часто в публикациях, посвященных ИПД, обсуждается, что основным механизмом, обеспечивающим образование нанозерен (структур), является зернограничное проскальзывание (ЗГП).

Однако в работах [1–5] показано, что ЗГП – не единственный реализованный при ИПД механизм: еще одним важнейшим механизмом является релаксационный процесс динамической рекристаллизации. Поэтому фрагментация зерен металлов и сплавов при ИПД сменяется двумя релаксационными процессами – ЗГП и динамической рекристаллизацией. Такая перестройка объясняет особые свойства материалов, подвергнутых ИПД, при дальнейших деформационных и термических обработках.

К необычным эффектам, проявляющимся в материалах после ИПД и дальнейшей холодной деформационной обработки, относятся: повышение плотности; замедленное формирование анизотропии зерен и свойств; увеличение размера зерна при повышении прочности и пластичности; возможность деформировать материал до высоких степеней деформации без отжига вследствие большого запаса пластичности σ_{YS}/σ_{UTS} и др. При термической обработке проявляются такие необычные эффекты, как: увеличение скорости сфероидизации пластин избыточной фазы; изменение количественного соотношения фаз вследствие растворения избыточных фаз в твердом растворе; устойчивость зеренной структуры к рекристаллизации и вторичной рекристаллизации вследствие формирования равновесных границ.

В данной работе мы не будем подвергать подробному анализу изложенные факты (так как они достаточно широко и глубоко освещены в печати [2–6]), а изучим особенности поведения материала, полученного по схеме ИПД (прокатка со сдвигом) при дальнейших механических воздействиях. Для этого проведем сравнительный анализ диссипации энергии при растяжении стали СтЗ, полученной ИПД путем ПС и СТ.

В работе [7] G.I. Taylor и H. Quinney оценили, что количество теплоты, выделяющееся в процессе деформирования меди, составляет 80–90% от работы, затраченной на деформирование материала. В то же время результаты, полученные E.A. Pieczyska, S.P. Gadaj и W.K. Nowacki для отожженной нержавеющей стали, показывают, что выделившаяся теплота составляет 60–70% от удельной работы пластической деформации [8]. В этом случае удельная работа пластической деформации меньше диссипирует за счет выделения в виде теплоты (сравнить данные [7] и [8]). Как видно, разница составляет заметную величину – более 20%.

Количество выделяющейся теплоты определяется, во-первых, подвижностью дефектов в материале (их количеством и расположением), во-вторых, физическими особенностями (типом решетки, наличием примесей) материала. Поэтому авторы [8] считают, что если сравнивать разные материалы (медь, сталь), то большее количество выделившейся теплоты для меди, чем для стали, связано с пластичностью материала. Вследствие этого делается предположение, что около 20% удельной работы деформации поглощается за счет образования дефектов деформации их передвижения.

Другой вопрос: как будет проходить диссипация удельной работы пластической деформации в случае, если исследуется один и тот же материал, но

деформировался он по разным режимам. Этому вопросу и посвящена статья, рассматривающая растяжение образцов из стали Ст3 после деформации ПС и СТ.

Таким образом, *целью* работы является оценка количества теплоты, выделившейся в процессе пластической деформации в образцах малоуглеродистой стали, изготовленных ПС, а также проведение сравнительного анализа диссипации энергии в этой стали, полученной СТ и ПС.

2. Материалы и методика эксперимента

В настоящей работе исследуется низкоуглеродистая сталь Ст3 следующего химического состава, %: 0.17 C, 0.2 Si, 0.54 Mn, 0.14 Cr, 0.14 Ni и 0.25 Cu.

Известно [10], что часть работы в процессе пластической деформации dA_p поглощается материалом, а другая – рассеивается в виде теплоты dQ . Таким образом, поглощенная энергия dE_s определяется как разность между работой пластической деформации и количеством теплоты, рассеявшимся в окружающую среду [10]:

$$dE_s = dA_p - dQ.$$

Работу пластической деформации обычно находят из диаграммы растяжения. Поэтому для выполнения оценки количества выделившейся теплоты и сравнительного анализа стали Ст3 в состоянии после СТ и ПС были изготовлены стандартные плоские образцы для испытаний на разрыв. Испытания на растяжение проводили с привлечением пластометра STD 810 фирмы ВÄHR – Thermoanalyse GmbH при постоянной скорости деформирования, равной $1.67 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Наиболее часто [8,10,11] теплоту, выделяющуюся в процессе пластической деформации, определяют тепловизионным методом. Термочувствительность системы составляет 0.3 К. Оценку поглощенной энергии выполняли с использованием данных тепловизионных измерений по методике, предложенной в работах [9,10].

В то же время, как видно из статей [8,9], исследователи расходятся в оценках поглощенной и рассеянной материалом энергии. В связи с этим необходимо применить методику оценки количества теплоты, выделяющейся в результате термопластического эффекта, а также провести сравнительный анализ изменения диссипации энергии для малоуглеродистых сталей в состоянии после традиционной прокатки и прокатки со сдвигом.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Нами обнаружено, что разница между потребляемой двигателем вала мощностью при СТ и ПС составила 30% [1]. Как известно, мощность двигателя вала прямо пропорционально связана с давлением на рабочий инстру-

мент и накопленной деформацией. Поэтому увеличение потребляемой мощности при прокатке со сдвигом свидетельствует о большей деформации металла в сравнении со стандартной прокаткой.

Зафиксировано также (рис. 1), что при выполнении ПС температура металла при прохождении калибра растет в 2.5 раза быстрее ($\Delta T \approx 50^\circ\text{C}$), чем при СТ ($\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$).

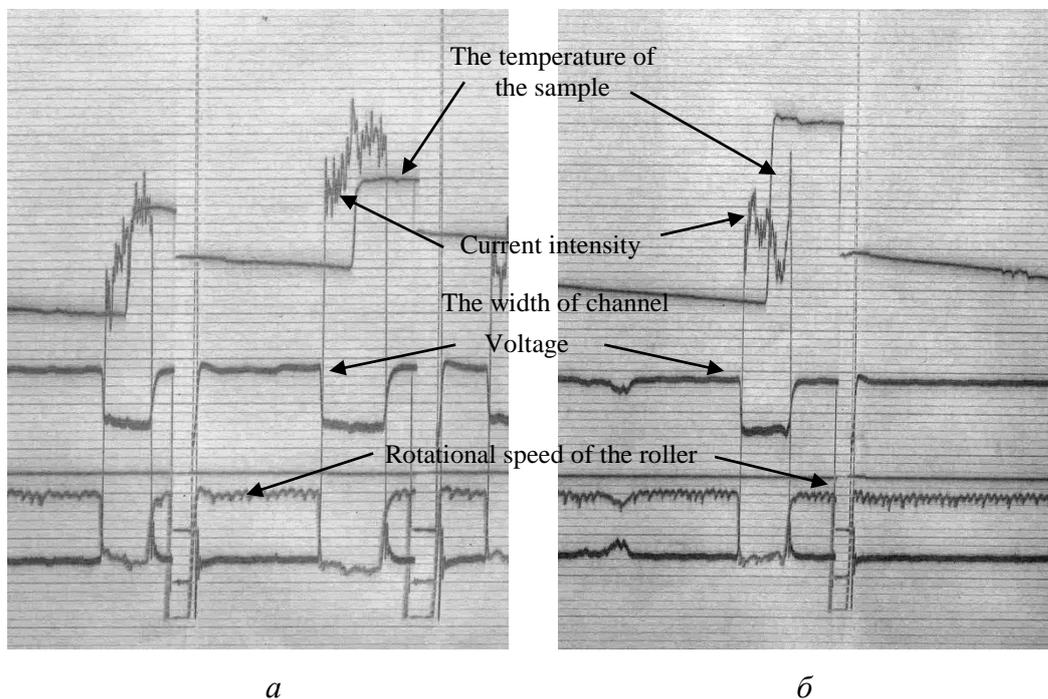


Рис. 1. Характеристики силового режима работы клетки: *a* – стандартный калибр ($\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$, $\Delta U \approx 15 \text{ V}$, $\Delta I \approx 6 \text{ A}$); *б* – сдвиговой калибр ($\Delta T \approx 50^\circ\text{C}$, $\Delta U \approx 15 \text{ V}$, $\Delta I \approx 4.5 \text{ A}$)

Кроме того, обычно изменение температуры в стандартном калибре описывается классической зависимостью резкого подъема температуры в момент попадания металла в калибр и ее неизменностью при прохождении калибра. Этот момент сопровождается ростом силы тока, потребляемого двигателем валков, и падением напряжения, а также снижением скорости вращения прокатного валка.

В то же время для сдвигового калибра зависимость носит принципиально другой характер: сила тока на первом этапе резко растет, а затем (при прохождении металла по калибру) – падает (рис. 1). При этом температура также резко возрастает при вхождении металла в калибр и уменьшается на 10% при дальнейшем его прохождении, что находится за пределами погрешности эксперимента. Такое снижение температуры в очаге деформации – не типичное явление, поскольку классические схемы обработки металлов давлением обычно приводят к разогреву металла в деформирующем устройстве [7]. Это

явление объяснено в [1] протеканием процесса интенсифицированного движения дефектов, который приводит к «быстрой» перестройке границ зерен от мало- до высокоугловых за счет формирования и движения точечных, линейных и объемных дефектов в поле сдвиговых напряжений.

В целом же больший прирост температуры приводит к большему количеству теплоты, выделившейся в сдвиговом калибре, по сравнению с обычным. Предположим, что в случае реализации растяжения стали Ст3 после ПС наблюдается подобный эффект, т.е. количество выделившейся теплоты в образцах будет больше, чем в случае, когда испытывают материал после СТ. Рассмотрим, наследуется ли эффект большего выделения тепла при растяжении Ст3 после ПС. Для этого проведем оценку поглощенной энергии при растяжении исследуемого материала после обоих видов деформации.

На рис. 2 представлена 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.

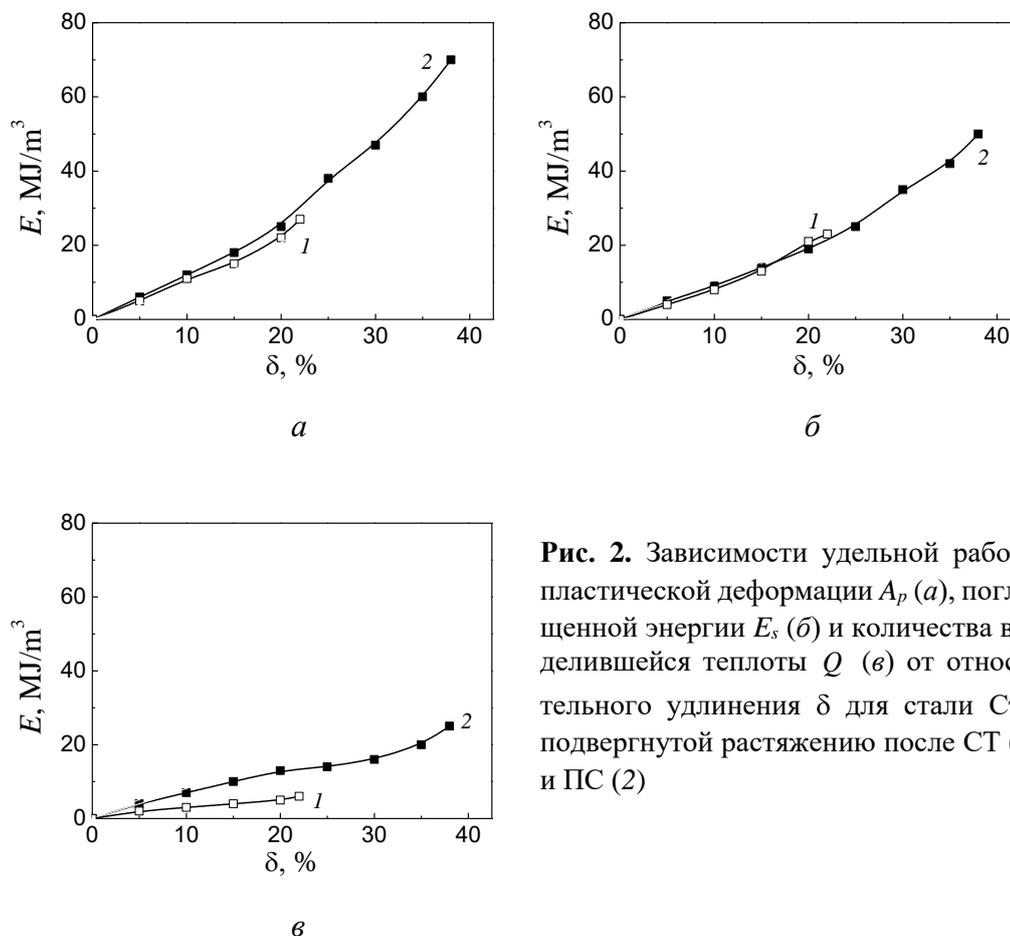


Рис. 2. Зависимости удельной работы пластической деформации A_p (а), поглощенной энергии E_s (б) и количества выделившейся теплоты Q (в) от относительного удлинения δ для стали Ст3, подвергнутой растяжению после СТ (1) и ПС (2)

Удельная работа пластической деформации (рис. 2,а) существенно выше для случая растяжения образцов стали Ст3 после ПС, что объясняется их

большой пластичностью. Так, после ПС: $\sigma_{YS} = 298 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{UTS} = 404 \text{ N/mm}^2$, $\delta_5 = 38\%$; после СТ: $\sigma_{YS} = 280 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{UTS} = 373 \text{ N/mm}^2$, $\delta_5 = 22\%$.

Большая же пластичность может определяться другим сценарием формирования и структурирования дефектов при прокатке со сдвигом в сравнении со стандартной прокаткой. Нами в эксперименте зафиксировано, что измеренная рентгенографически плотность дефектов стали Ст3 различается на несколько порядков для разных видов прокатки (после ПС – 10^6 см^{-2} , после СТ – 10^{10} см^{-2}). Плотность дефектов после растяжения составляет 10^{12} см^{-2} для обоих видов прокатки.

Это означает, что при последующем растяжении для ПС-образцов должна наблюдаться большая доля поглощенной энергии, так как она будет расходоваться на формирование большего количества дефектов, чем в образцах после СТ. Именно это мы и наблюдаем в эксперименте (рис. 2,а).

Абсолютное значение энергии, поглощенной материалом после ПС, в сравнении с его СТ-состоянием больше в $\sim 2\text{--}2.5$ раза. Сопоставление зависимостей позволяет говорить о том, что предельная удельная работа пластической деформации (вплоть до разрушения образцов) для схем деформации ПС и СТ составляет соответственно 70 и 25 MJ/m^3 . Кроме того, относительная величина на единицу удлинения составляет 1.8 и 1.1 MJ/m^3 соответственно.

Анализ зависимостей показал, что количество выделившейся в результате термопластического эффекта теплоты в образцах, прокатанных по схеме ПС, составляет $\sim 30\%$ от работы пластической деформации (рис. 2,б). После ПС часть работы, поглощенной материалом, достигает 70%. Для СТ-технологии количество теплоты, выделившейся в результате термопластического эффекта, составляет $\sim 10\%$ от работы пластической деформации, остальные $\sim 90\%$ 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). Следовательно, как и в работах [7,8], более пластичному материалу соответствует большее количество выделившейся теплоты.

4. Заключение

Проведение сравнительного анализа диссипации энергии при растяжении стали Ст3, полученной СТ и ПС, показывает, что удельная работа пластической деформации выше для образцов после ПС. Этот факт объясняется большей пластичностью материала после ПС.

Оценка количества теплоты, выделившейся в процессе растяжения в исследуемых образцах малоуглеродистой стали Ст3, показала, что процентное соотношение Q для образцов после ПС существенно выше, чем после СТ (90 и 70% соответственно).

Предельная удельная работа пластической деформации при растяжении (вплоть до разрушения образцов) для схем деформации ПС и СТ составляет

70 и 25 MJ/m³ соответственно, что позволяет сделать вывод о большем ресурсе пластичности образцов после ПС.

Обнаруженные закономерности изменения энергетических параметров прокатки, температуры металла в калибре, удельной работы пластической деформации и плотности дефектов подтверждают различный характер пластической деформации при растяжении образцов стали Ст3, полученных ПС и СП.

1. *Е.Г. Пашинская*, Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации, Вебер, Донецк (2009).
2. *Е.Г. Пашинская, Ю.Н. Подрезов, В.В. Столяров, А.В. Завдоев, И.И. Тищенко*, ФММ **15**, 26 (2012).
3. *E. Pashinska, V. Varyukhin, A. Zavadov, V. Stolyarov*, Emerging Materials Research **1**, 121 (2012).
4. *Е.Г. Пашинская, А.А. Толпа, А.В. Завдоев*, Труды Международной научно-практической конференции «Инновационные ресурсосберегающие материалы и упрочняющие технологии», ПДТУ, Мариуполь (2012), с. 139–140.
5. *Е.Г. Пашинская, В.Н. Варюхин*, Труды Международной конференции «HighMatTech», Киев (2009), с. 75.
6. *А.В. Бобылев*, Механические и технологические свойства металлов: Справочник, Металлургия, Москва (1987).
7. *G.I. Taylor, H. Quinney*, Proc. Roy. Soc. **A134**, 307 (1934).
8. *Е.А. Pieczyska, S.P. Gadaj, W.K. Nowacki*, in: Quantitative infrared thermography 5, QIRT'2000, Proceedings of Eurotherm Seminar No. 64, Reims, France (2000), pp. 260–264.
9. *А.М. Иванов, Е.С. Лукин, А.М. Иванов*, Заводская лаборатория. Диагностика материалов **75**, № 11, 46 (2009).
10. *W. Oliferuk*, in: Quantitative infrared thermography 4, QIRT'98, Proceedings of Eurotherm Seminar No. 60, Lodz, Poland (2000), pp. 134–139.
11. *М.В. Дегтярев, Л.М. Воронова, Т.И. Чащухина*, ФММ **97**, № 1, 78 (2004).

Е.Н. Pashinskaya, V.M. Tkachenko, A.V. Zavadov

ENERGY DISSIPATION DURING THE TENSION OF THE St3 STEEL PRODUCED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION BY THE ROLLING WITH SHEAR

The comparative analysis of the energy dissipation in the process of tension of the St3 steel samples produced by severe plastic deformation (SPD), namely, rolling with shear (ShR) and the standard rolling (SR), was fulfilled. During the tensile tests, it has been shown that the general specific work of the plastic deformation of the samples after rolling with shear is higher than that after the standard rolling. The revealed regularities of the changes in the energy parameters of rolling, the temperature of the metal in the rolling grooves, the specific work of plastic deformation, the density of defects confirm different nature of plastic

deformation by tension for the St3 samples produced by rolling with shear, comparing with the samples produced by the standard rolling.

Keywords: energy dissipation, severe plastic deformation, rolling with shear

Fig. 1. Characteristics of the force conditions of the stand work: a – standard channel ($\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$, $\Delta U \approx 15$ V, $\Delta I \approx 6$ A); b – shear channel ($\Delta T \approx 50^\circ\text{C}$, $\Delta U \approx 15$ V, $\Delta I \approx 4.5$ A)

Fig. 2. Specific work of plastic deformation A_p (a), absorbed energy E_s (b) and the evolved heat Q (c) vs the relative elongation δ in the St3 steel processed by tension after the SR (1) and ShR (2)