

ISSN 0430-8252

ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

5-1985

зионно-абразивной среде наблюдается четкая корреляция. Оптимальный режим обработки исследуемой стали — степень деформации при НТМО 30%, последующий отпуск при 200 °С.

1. Влияние низкотемпературной термомеханической обработки на кристаллоструктурное состояние, износостойкость и контактную усталость сталей / О. И. Козырский, А. С. Опальчук, Р. А. Хруник и др. — ФХММ, 1984, № 2, с. 53—56.
2. Justunsson W. M., Schmatz D. J. Same observation on the strength of martensite formed from cold-worked austenite. — Trans. Quart. ASM, 1962, v. 55, p. 640—653.
3. Schmatz D. J., Zackey V. F. Mechanical properties of deformed metastable austenitic ultra high strength steel. — Trans. ASM, 1959, v. 51, p. 476—494.
4. Опальчук А. С., Фишман К. К. Влияние температуры отпуска на механические свойства углеродистых и низколегированных сталей после НТМО. — В кн.: Термомеханическое упрочнение машиностроительных сталей. Киев: Знание, 1974, с. 7—8.
5. Процессы отпуска стали У8А, подвергнутой низкотемпературной термомеханической обработке / М. П. Браун, Ю. Ф. Юрченко, А. С. Опальчук и др. — Изв. вузов. Чер. металлургия, 1974, № 12, с. 102—104.

Украинская сельскохозяйственная академия, Киев;
Физико-механический институт
им. Г. В. Карпенко АН УССР, Львов

Получено
04.05.84

УДК 539.37:621.771

С. И. КОВАЛЕВ, В. И. САВЕНКО, Е. Д. ЩУКИН
**ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
АДСОРБЦИОННО-ПЛАСТИФИЦИРОВАННОЙ ПОЛОСЫ
НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИАЛА
ПРИ ПРОКАТКЕ**

При теоретическом анализе влияния технологической смазки на характеристики процесса прокатки и напряженно-деформированное состояние материала обычно учитывают лишь изменение под влиянием среды коэффициента трения в зоне контакта полосы с валками [1]. Вместе с тем пластифицирующая смазка может заметно снижать также предел текучести приповерхностного слоя материала [2]. Учет последнего обстоятельства при математическом моделировании прокатки толстых полос и тонких фольг является существенным [3, 4].

Следует, однако, отметить, что положенная в основу анализа [3, 4] структурно-реологическая модель поверхностно-пластифицированного материала не учитывает влияния смазочной среды также на коэффициент упрочнения приповерхностного слоя полосы. Между тем при обработке металлов давлением некоторые виды активных смазок могут изменять его в широком диапазоне значений [5]. В этой связи данная работа посвящена теоретическому анализу особенностей напряженно-деформированного состояния, возникающего в материале при его прокатке в присутствии технологических смазочных сред, меняющих, наряду с пределом текучести, также и коэффициент деформационного упрочнения приповерхностного слоя полосы.

Как и ранее [4], процесс плоской прокатки толстой полосы моделировали путем численного эксперимента на ЭВМ БЭСМ-6. Обработке подвергали модельный упругопластический упрочняющийся материал, близкий по механическим показателям к свинцу. Свойства материала определяли пределом текучести на сдвиг τ_t , модулем сдвига $G=500 \tau_t$, модулем всестороннего сжатия $K=500 \tau_t$ и упрочнением, описываемым при помощи функции $T(e) = (\sqrt{3} + \alpha_t e) \tau_t$ [4], где e — степень пластической деформации. При этом значения предела текучести τ_t и коэффициента упрочнения α_t выбирали в зависимости от глубины рассматриваемого слоя: τ_{ss} и α_{ss} — в приповерхностном слое полосы; τ_s и α_s — во внутренних точках очага деформации. Геометрические размеры очага деформации задавали следующими параметрами (рис. 1): относительным обжатием $\varepsilon = (H_1 - H_2)/H_1 = 0,182$ и коэффициентом формы $* 2L/(H_1 +$

* L — длина очага деформации (см. рис. 1).

$+H_2)=1$, которые соответствовали случаю наиболее отчетливого влияния характеристик приповерхностного слоя на напряженно-деформированное состояние материала при прокатке [6].

Влияние смазочной среды на свойства материала при его формоизменении учитывали в явном виде лишь в граничных условиях [4]. В зонах опережения и отставания эти условия имели вид:

$$\tau_{nt} = \begin{cases} \mp \mu \sigma_{nn}, & \text{если } |\mu \sigma_{nn}| \leq \tau_{ss} (\sqrt{3} + 2,5e)/\sqrt{3}, \\ \pm \tau_{ss}, & \text{если } |\mu \sigma_{nn}| > \tau_{ss} (\sqrt{3} + 2,5e)/\sqrt{3}, \end{cases}$$

где μ — коэффициент трения. Верхний знак соответствует зоне отставания, нижний — зоне опережения.

Соотношения между численными значениями параметров τ_{ss} и α_{ss} и τ_s и α_s выбирали, исходя из того,

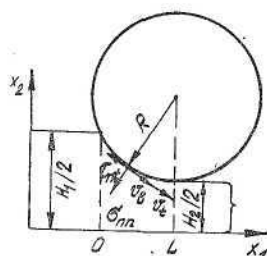


Рис. 1. Схема очага деформации. Соотношения векторов скоростей и напряжений в материале вдоль дуги захвата соответствуют зоне опережения.

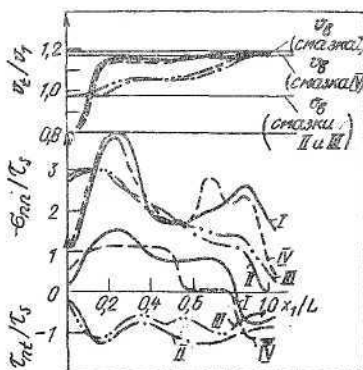


Рис. 2. Распределение касательных скоростей v_1 частиц металла в приповерхностном слое полосы, а также нормальных (σ_{nn}) и касательных (τ_{nt}) напряжений по дуге захвата при прокатке со смазками различного типа.

что среды по-разному могут влиять на приповерхностный слой металла:

— свойства поверхности и объема не отличаются (среда типа I):

$$\tau_{ss} = \tau_s, \alpha_{ss} = \alpha_s;$$

— напряжение начала течения приповерхностного слоя снижается, а упрочняется он так же, как объемные слои металла (среда типа II):

$$\tau_{ss} = 0,5\tau_s, \alpha_{ss} = \alpha_s;$$

— приповерхностный слой не упрочняется (среда типа III): $\tau_{ss} = 0,5\tau_s, \alpha_{ss} = 0$;

— приповерхностный, первоначально пластифицированный слой металла упрочняется сильнее, чем объемные (среда типа IV): $\tau_{ss} = 0,5\tau_s, \alpha_{ss} = 2\alpha_s$. При этом коэффициент упрочнения материала в объеме полосы во всех случаях оставался неизменным.

Напряженно-деформированное состояние материала определяли путем численного решения методом конечных разностей полной системы уравнений, описывающих медленное (при малом скоростном напоре) установившееся упругопластическое течение металла при прокатке в состоянии плоской деформации. При расчетах использовали алгоритм, всесторонне проверенный на практике [7]. На основе экспериментальных данных были взяты следующие значения характеристик материала: $\tau_s = 7,5$ МПа; $\mu = 0,4$ (независимо от типа среды); $\alpha_s = 0,25$.

Согласно расчету (рис. 2), введение в контакт активной смазочной среды, в зависимости от ее свойств, может радикально изменить течение процесса. Так, моделирование устойчивой прокатки в средах II и III типа, не вызывающих усиленного упрочнения пластифицированного слоя металла, дало положительный результат лишь в случае переднего натяжения полосы, близкого к ее пределу текучести. При этом в указанном режиме на всей дуге захвата имела место только зона опережения, нейтральное сечение располагалось на входе в очаг де-

формации и поверхность полосы во всем очаге проскальзывала в валках (рис. 2). Такой режим формоизменения полосы приближается по своему характеру к волочению и, в соответствии с классификацией [8], именуется прокаткой-волочением.

Устойчивая естественная прокатка (т. е. при отсутствии переднего натяжения) оказалась возможной в среде типа I, а также в среде, усиленно упрочняющей пластифицированный слой полосы при ее формоизменении (тип IV). При этом на контактной поверхности очага деформации присутствовали развитые зоны отставания и опережения, а давления на валки ($-\sigma_{nn}$) по сравнению с прокаткой в условиях

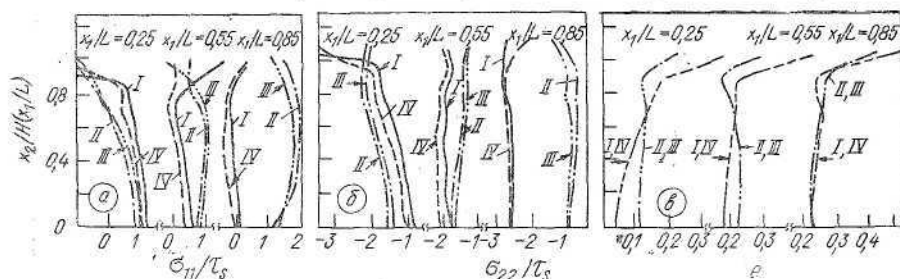


Рис. 3. Распределение компонент σ_{11} (а) и σ_{22} (б) тензора напряжений и степени пластической деформации металла (в) по толщине полосы в характерных сечениях (x_1/L) очага деформации при прокатке со смазками различного типа.

переднего натяжения, в соответствии с общей теорией [6], заметно возросли.

Таким образом, сопоставление результатов модельных экспериментов при прокатке в различных смазочных средах вскрыло тот факт, что необходимым требованием для ее реализации является не только достаточно высокий (регламентируемый углом захвата) коэффициент кулоновского трения между валками и полосой [1]. При прокатке толстых полос не менее существенно ограничение, налагаемое на предел текучести и коэффициент упрочнения поверхностного слоя полосы. Действительно, чтобы обеспечить передачу энергии формоизменения от валков к полосе, нужны довольно большие силы трения, которые зачастую обеспечиваются не только коэффициентом трения, но и пределом текучести приповерхностного слоя полосы. Соблюдение последнего условия особенно важно для устойчивой прокатки при высоких степенях деформации, когда касательные контактные напряжения почти по всей дуге захвата достигают предела текучести материала полосы на сдвиг. Анализ напряженно-деформированного состояния материала в очаге показывает, что, в соответствии с граничными условиями, обсуждаемые модельные варианты прокатки также можно разбить на две группы. В первую группу объединяются случаи прокатки в смазочной среде, дающей относительно невысокие (по сравнению с объемом) коэффициенты упрочнения поверхностного слоя металла (типы смазок II и III). Во вторую — случаи прокатки с активной смазкой, вызывающей в поверхностном слое полосы повышенный коэффициент упрочнения, а также когда свойства поверхностного слоя и объема не отличаются (типы смазок IV и I). Результаты расчетов свидетельствуют (рис. 3а, б), что использование смазок первой группы приводит к общему выравниванию напряжений по толщине полосы, снижая их в приповерхностном слое материала. Кроме того, смазки II и III типов в целом «смягчают» напряженное состояние на входе в очаг, уменьшая растягивающие напряжения и увеличивая сжимающие. Однако на выходе из очага действие смазок указанной группы радикально меняется, усугубляя «жесткость» напряженного состояния материала полосы. Данное обстоятельство, по-видимому, является следствием перехода от условий естественной прокатки к режиму прокатки-волочения.

Модельными экспериментами также установлено (см. рис. 2 и рис. 3), что путем подбора смазочной среды, обеспечивающей достаточно высокий по сравнению с объемом коэффициент упрочнения приповерхностного слоя материала, можно компенсировать влияние снижения предела текучести на напряженное состояние в очаге деформации.

Такие же выводы позволяет сделать анализ деформированного состояния материала в очаге (рис. 3а). Прежде всего нужно отметить, что степень пластической деформации материала в объеме полосы почти всегда ниже, чем в приповерхностном слое, независимо от типа смазки [1, 2]. Однако влияние типа смазки на деформацию материала действительно наблюдается; оно зависит от зоны очага и глубины залегания рассматриваемого слоя металла под поверхностью контакта. По характеру влияния на степень пластической деформации смазочные среды также можно разбить на две группы. При модельной прокатке со смазками первой группы (типы смазок II и III) пластическая деформация в объеме и на поверхности очага гораздо более равномерная из-за перераспределения пластической проработки материала в объеме и в приповерхностном слое полосы в режиме прокатки-волочения (см. рис. 3а). При этом смазки первой группы повышают средний уровень пластической деформации в объеме и снижают его в приповерхностном слое материала, что особенно заметно во входной зоне очага деформации. При приближении к выходу из валков и по мере увеличения общей деформации в очаге разница во влиянии типа смазочной среды на степень пластической деформации глубинных слоев материала практически исчезает. Различия сохраняются лишь в достаточно тонком приповерхностном слое полосы.

Аналогичные результаты были получены при исследовании влияния смазочных сред всех типов на касательные компоненты тензора напряжений в материале полосы в ее объеме, а также при изучении напряженно-деформированного состояния металла во внеконтактных зонах очага деформации.

Таким образом, напряженно-деформированное состояние полосы при прокатке в значительной степени определяется влиянием смазки на реологию поверхностного слоя материала. Иными словами, при теоретическом анализе действия смазочной среды на процесс прокатки толстых полос целесообразно учитывать обе формы проявления эффекта: снижение предела текучести и изменение упрочнения в приповерхностном слое материала. При этом математическая модель формоизменения материала достаточно правильно воспроизводит реальную картину прокатки в соответствующих условиях [1, 2, 6]. Последнее обстоятельство дает возможность эффективно рассчитывать оптимальные технологические режимы прокатки, не прибегая к трудоемким и дорогостоящим натурным испытаниям.

1. Теория прокатки: Справ. / Ред. В. И. Зюзин, А. В. Третьяков. — М.: Металлургия, 1982. — 336 с.
2. Вейлер С. Я., Лихтман В. И. Действие смазок при обработке металлов давлением. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 232 с.
3. Ковалев С. И., Савенко В. И., Шукин Е. Д. Математическое моделирование влияния активной смазочной среды на напряженное состояние материала при прокатке тонких фольг. — ФХММ, 1983, № 6, с. 36—40.
4. Ковалев С. И., Савенко В. И. Влияние адсорбционного пластифицирования на напряженно-деформированное состояние металла при прокатке полосы. — В кн.: Пластическая деформация легких и специальных сплавов. М.: Металлургия, 1982, т. 2, с. 143—148.
5. Любимова Т. Ю. Влияние адсорбции из окружающей среды на степень наклепа металлов при периодическом поверхностном деформировании. — ЖТФ, 1950, 20, № 11, с. 1334—1343.
6. Целиков А. И., Гришков А. И. Теория прокатки. — М.: Металлургия, 1970. — 360 с.
7. Ковалев С. И., Корягин Н. И., Ширко И. В. Напряжения и деформации при плоской прокатке. — М.: Металлургия, 1982. — 256 с.
8. Выбрий В. Н., Федосиенко А. С., Крайнов В. И. Процесс непрерывной прокатки. — М.: Металлургия, 1970. — 456 с.