

**Исследование распределения пластической деформации по толщине стальных полос**

д.т.н. Алдунин А.В., Шумеев А.В.

Университет машиностроения

тел.: (495) 223-05-23, доб. 1282, [kiiod@mail.ru](mailto:kiiod@mail.ru)

*Аннотация.* Проведено исследование распределения деформации по толщине клиновидных образцов, полученных с помощью горячей прокатки. Применительно к данным условиям при прокатке в широкополосном стане распределение деформации по толщине полос оценивали методом винтов, а характер структуры уточняли металлографическим методом. Приведены графики распределения деформации в образцах и фотографии структуры. Представлены графики неоднородности накопленной деформации по толщине предварительно выдавленной технологической канавки.

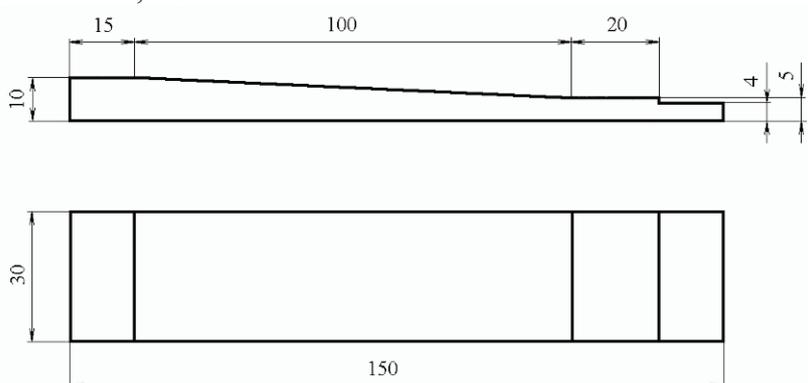
*Ключевые слова:* неравномерность деформации, прокатка, метод винтов, структура металла.

Надежность работы конструкций, изготовленных из горячекатаных стальных листов, существенно зависит от равномерности структуры и свойств стали по толщине листов. Поэтому при прокатке стальных полос и листов важен характер распределения пластической деформации по их толщине.

Изучению локализации деформации при горячей листовой прокатке посвящены работы многих авторов [1, 2, 3] и др. Известно, что основное влияние на распределение деформации по толщине прокатываемых полос оказывает отношение длины дуги захвата к средней толщине полосы в очаге деформации  $l_0/h_{cp}$ .

В данной работе применительно к условиям горячей прокатки в чистовой группе непрерывного широкополосного стана (НШС) распределение деформации по толщине полос оценивали методом винтов [11], а характер структуры уточняли металлографически.

Исследования выполняли на лабораторном высокоскоростном двухвалковом стане 250 с чугунными валками диаметром 274 мм. Прокатывали клиновидные образцы размером 5(10)×30×150 мм (рисунок 1) из стали СтЗсп химического состава, %: С 0,15; Мп 0,52; Si 0,22; S 0,037; P 0,019 и Al 0,052.



**Рисунок 1. Исходный образец для прокатки**

При этом моделировали все основные технологические параметры: температуру прокатки  $t = 785 - 1070^\circ\text{C}$ ; среднее относительное обжатие  $\varepsilon_{cp} = 15 - 30\%$ ; скорость прокатки  $V = 5$  м/с и, соответственно, среднюю скорость деформации  $U \approx 90$  с<sup>-1</sup>; отношение  $l_0/h_{cp} = 2,1 \div 2,6$ . Для исключения влияния размера исходного зерна аустенита при разных температурах про-

катки все образцы аустенизировали при 1100°C.

Через 2,5 с после выдачи из печи образец задавали в зазор между валками. Относительная деформация за проход менялась в пределах 0 – 50 % по длине клиновидного образца. После прокатки и выдержки на воздухе образец сбрасывали в закалочный бак с 12 %-ным раствором *NaCl* для фиксации полученной структуры.

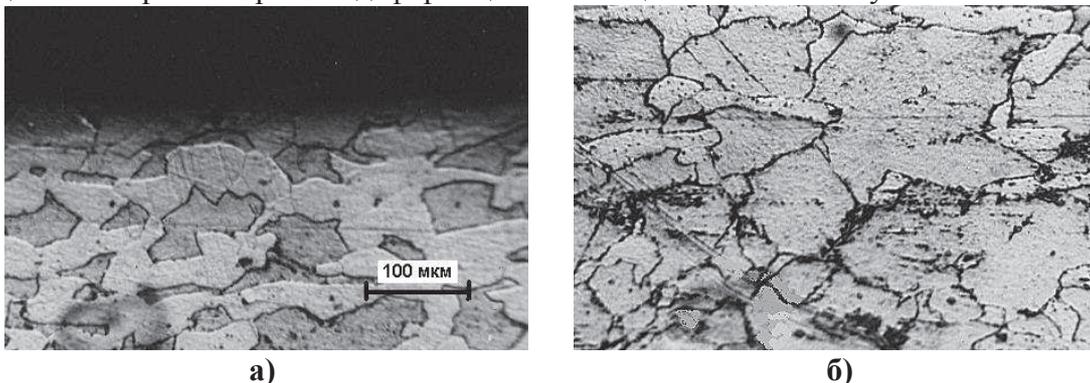
Прокатанные образцы были разрезаны поперек направления прокатки по осям винтов. Шаг винтов, продеформированных вместе с образцами, измеряли в плоскости приготовленных шлифов по всей толщине образцов при помощи оптического микроскопа с точностью до 1 мкм. По полученным величинам среднего исходного  $\bar{\lambda}_0$  и деформированного  $\bar{\lambda}_1$  шагов резьбы подсчитывали относительную деформацию  $\varepsilon$  каждого шага:  $\varepsilon = (\bar{\lambda}_0 - \bar{\lambda}_1) / \bar{\lambda}_0 \cdot 100\%$ . Была оценена достоверность полученных опытных данных. Для винтов МЗ, имеющих средний исходный шаг резьбы  $\bar{\lambda}_0 = 500$  мкм, среднеквадратическое отклонение  $S_{\bar{\lambda}_0}$  составляло 5,46 мкм. На рисунке 2 с надежностью  $P = 0,95$  и доверительной оценкой  $e = 2\%$  приведены для сравнения две кривые распределения деформации по толщине образцов, прокатанных на толщину 5 мм.



**Рисунок 2. Распределение относительной деформации по толщине образцов, прокатанных при  $t = 785^\circ\text{C}$  и средней деформации: 1 –  $\varepsilon_{\text{ср}} = 15\%$ ; 2 –  $\varepsilon_{\text{ср}} = 23\%$**

В тех же поперечных сечениях образцов травлением в концентрированном водном растворе пикриновой кислоты с добавкой нескольких капель синтола выявлена структура металла.

Как видно из полученных опытных данных, при  $\varepsilon_{\text{ср}} = 15\%$  (см. рисунок 2) имеется существенная неравномерность деформации по толщине прокатанного образца – на глубине 1 мм  $\varepsilon = 10\%$ , а в поверхностном слое  $\varepsilon = 21\%$ . С увеличением среднего относительного обжатия до 30 % неравномерность деформации по толщине постепенно уменьшается.



**Рисунок 3. Структура поверхностного слоя образца (а) и на глубине 0,6 мм (б)**

На рисунке 3 представлены фотографии структуры поверхностного и внутреннего слоев образца, прокатанного при  $t = 785^\circ\text{C}$  и  $\varepsilon_{\text{ср}} = 15\%$ , охлажденного в воде через 9 с после прокатки. Структура в поверхностном слое в виде продуктов неполного превращения (феррита, аустенита и частично сорбита) получена более мелкая (рисунок 3а), чем на глубине 0,6

мм от поверхности (рисунок 3б).

Рекристаллизация внутреннего слоя образца, как видно, прошла по критическому механизму и величина критической степени деформации  $\epsilon_{кр}$  составила около 12 % (рисунок 2).

Таким образом, при разработке режимов горячей прокатки стальных полос с целью получения более равномерных по толщине структуры и свойств металла относительное обжатие в клетях чистовой группы НШС следует выбирать с учетом характера распределения деформации по толщине раската.

Неоднородность деформации по толщине листа наблюдается и при деформации в холодном состоянии [4 – 10]. Особенно это становится актуальным при рассмотрении процесса деформации листового металла при выдавливании в полосе канавки катящимся индентором. Этот процесс существенно отличается и от процесса внедрения индентора одновременно по всей длине деформируемой канавки [4, 5].

В процессе выдавливания канавки имеет место существенное упрочнение металла. В теоретическом расчете оно отражено с помощью параметра  $\epsilon_0$ . Предпосылка, что процесс формирования дна канавки можно представить как простую осадку, как показали исследования, оказалась неприемлемой. В действительности осредненное значение  $\epsilon_0$  значительно

меньше величины  $\epsilon = \left| \ln \left( \frac{S_0}{h_0} \right) \right|$ .

Форма и размеры индентора, производящего выдавливание канавки, показаны на рисунке 4.

На силовые параметры процесса существенно влияет коэффициент трения, поэтому для выдавливания катящимся концентратором использовали смазку.

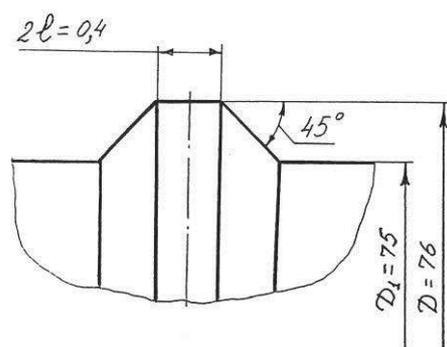
В результате воздействия на листовый материал в нем выдавливаются канавки-концентраторы трапециевидного сечения, обратные профилю, представленному на рис. 4.

Для экспериментов использовались листовые образцы из малоуглеродистой стали 08кп толщиной 0,64 и 0,79 мм.

После выдавливания канавки производился замер ее глубины.

Измерение величины выдавленной канавки производилось с точностью до 0,005 мм.

Для определения накопленной деформации и свойств материала в зоне канавки использовался метод твердости Деля. Сущность его заключается в возможности оценки накопленной материалом деформации по значениям его твердости.



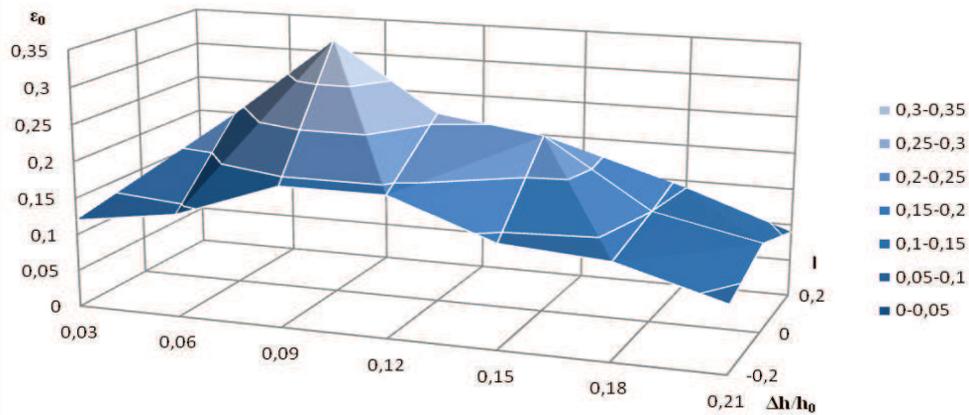
**Рисунок 4. Профиль индикатора для выдавливания технологической канавки**

Образец с выдавленной катящимся индентором канавкой разрезался в поперечном направлении. На срезе приготавливался микрошлиф и в зоне деформации измерялась микротвердость. Испытания проводились на приборе ПМТ-3.

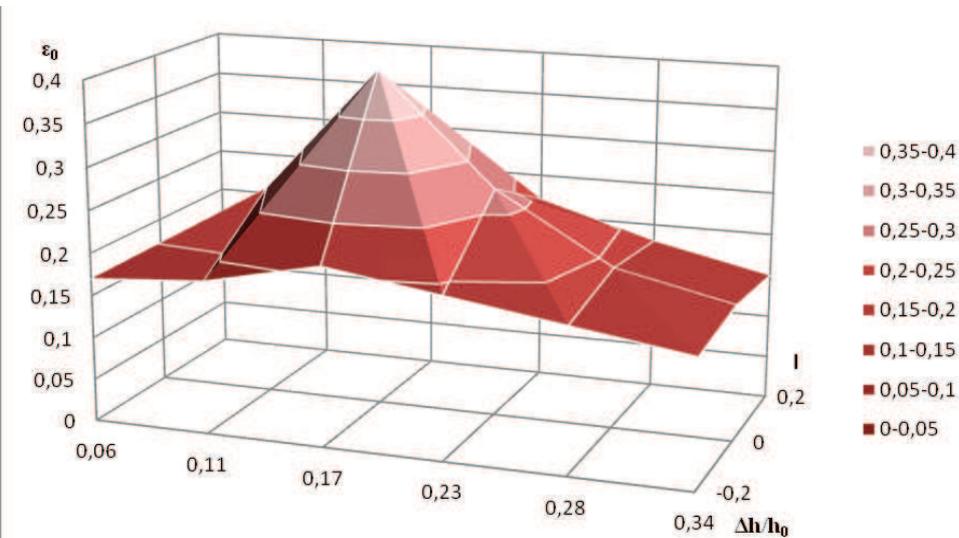
Результаты исследований показали, что распределение твердости по сечению канавки неравномерное (рисунок 5). Кроме того, характер распределения твердости значительно меняется при возрастании относительной глубины канавки в материале.

Твердость не остается постоянной и по ширине канавки. Наибольшая твердость имеет

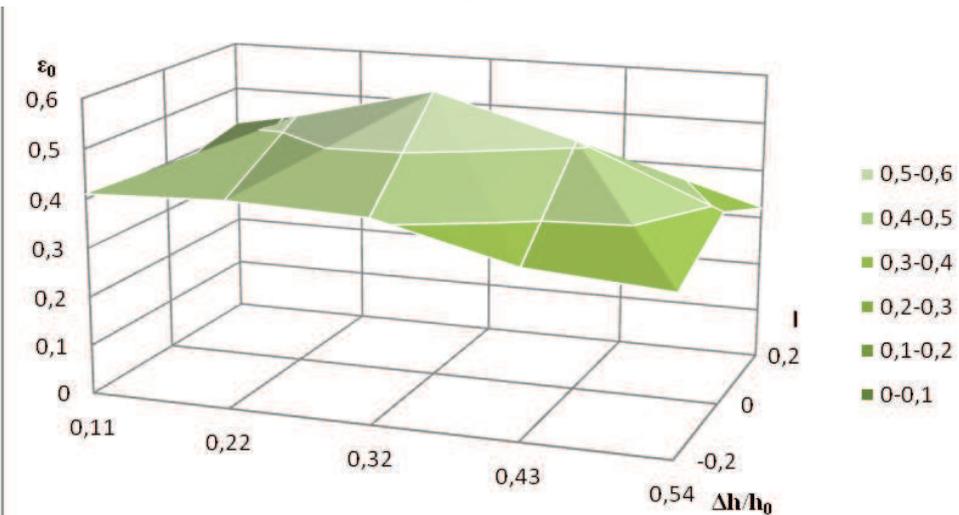
место по оси канавки, и ее значения постепенно снижаются к границам канавки.



а) относительная глубина  $(h_0 - S_0)/h_0 = 0,21$



б) относительная глубина  $(h_0 - S_0)/h_0 = 0,33$



в) относительная глубина  $(h_0 - S_0)/h_0 = 0,54$

**Рисунок 5. Распределение интенсивности накопленных деформаций материала по сечению канавки  $\epsilon_0$**

При наличии данных о распределении твердости по сечению канавки и тарировочный график зависимости изменения твердости от величины накопленной деформации находится

интенсивность деформации в точках замера твердости. Ряды на графиках отражают результаты замеров по толщине металла после прохода индентора ( $S_0$ ), три ряда на равном расстоянии – по ширине канавки, в узловых точках по высоте отложены значения накопленных деформаций в данных точках.

С увеличением относительной глубины канавки интенсивность деформации увеличивается, а неравномерность по сечению уменьшается, что следует из графиков, представленных на рисунке 5.

### Заключение

Для точного определения процесса деформации необходимо учитывать неравномерность свойств по толщине листа. С увеличением деформации ее неравномерность в процессе прокатки уменьшается.

### Литература

1. Павлов И.М. Теория прокатки. – М.: Металлургиздат, 1950. – 610 с.
2. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургиздат, 1947. – 532 с.
3. Теория прокатки: Справочник / Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
4. Типалин С.А. Экспериментальное исследование процесса выдавливания технологической канавки в оцинкованной полосе / Известия МГТУ «МАМИ», 2012. № 2. С. 208-213.
5. Типалин С.А. Определение накопленной деформации в процессе выдавливания технологической канавки / Заготовительные производства в машиностроении, 2013, № 8, с. 22-24.
6. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Исследование свойств многослойных листовых материалов / Заготовительные производства в машиностроении, 2013, № 1. С. 28-31.
7. Типалин С.А. Локализованный изгиб и скручивание оцинкованной полосы при формообразовании швеллера Известия МГТУ «МАМИ», 2012. № 2. , т. 2. С. 204-208.
8. Типалин С.А., Сапрыкин Б.Ю., Шпунькин Н.Ф. Краткий обзор многослойных листовых деформируемых материалов используемых для защиты от шума / Известия МГТУ «МАМИ», 2012. № 2., т. 2. С. 194-199.
9. Типалин С.А. Исследование изгиба упрочненного оцинкованного листа / Известия МГТУ «МАМИ», 2012. № 2., т. 2. С. 199-204.
10. Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Колесов А.В. Упругий изгиб биметаллического листа / Известия МГТУ «МАМИ», 2013. № 1, т. 2. С. 105-108.
11. Павлов И.М., Гельдерман Л.С., Жукова А.И. Количественный анализ неравномерности деформации при ковке // Металлург. – 1936. – № 7. – С. 17 – 20.

### **Счетные подходы к определению аргумента функции силы**

д.т.н. проф. Максимов Ю.В., к.т.н. доц. Анкин А.В., Чебышев А.И.

Университет машиностроения  
8 (495) 223-05-34, [ankin@mami.ru](mailto:ankin@mami.ru)

*Аннотация.* В статье рассмотрены подходы к определению момента начала перемещений «плавающих» элементов конструкции режущего модуля комбинированного инструмента для обработки нежестких валов.

*Ключевые слова:* комбинированная обработка, нежесткий вал, колебания, режущий модуль, крутильные колебания.

Проблема обеспечения качества обработки при заданной или большей производительности технологического процесса всегда была актуальной в технологии машиностроения. При решении этой проблемы создавались новые методы обработки, разрабатывались технологические процессы и новые инструменты. При этом в ряде случаев обеспечение качества обработки не подкреплялось экономическими показателями эффективности от внедрения