

7. Дукаревич, И.С. Перераспределение элементов в борированном слое / И.С. Дукаревич, М.В. Можаров, А.В. Шигаев // МиТОМ, 1973. – № 2. – С. 64–66.

8. Константинов, В.М. Изменение морфологии термодиффузионного боридного слоя при предварительном меднении основы / В.М. Константинов, В.Г. Дашкевич, М.А. Судников // Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф. (29 мая–02 июня 2017 г., г. Одесса). – Киев: АТМ Украины, 2017. – С. 65–68.

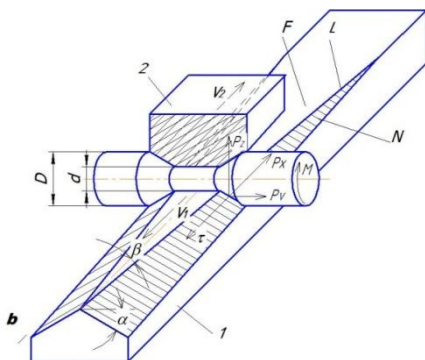
УДК 621.771

К.В. САДКО (ЗАО «Белтехнология и М»)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ОСЕВОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Поперечно-клиновое прокатывание относится к высокоэффективным процессам объемной деформации металлов и сплавов и применяется для производства изделий типа вал, ось, корпус и других тел вращения. Как известно, сущность процесса плоского поперечно-клинового прокатывания заключается в упругопластическом качении горячей заготовки между двумя клиновыми инструментами, параллельно перемещающимися навстречу друг другу и установленными на плитах, или вращающимися в одну сторону и установленными на валках с параллельными осями (рисунок 1).

Метод поперечно-клинового прокатывания имеет ряд преимуществ перед технологиями штамповки и точения. По сравнению с точением она обеспечивает более высокий коэффициент использования материала, низкую трудоемкость производства и более высокую производительность. При прокатывании получают повышенные механические свойства изделий в сравнении с резанием. Преимущества поперечно-клинового прокатывания по сравнению со штамповкой состоят в достижении более высокой производительности, достигаемого уровня точности изделий и стойкости инструмента [1].



1, 2 – пара противоположащих инструментов; *D* – диаметр начальной заготовки; *d* – диаметр, получаемый в результате прокатки; *V*₁, *V*₂ – направление движения и скорость инструмента *1* и *2*; *P*_{*x*}, *P*_{*y*}, *P*_{*z*} – составляющие силы, действующей на заготовку; *M* – вращающий момент, действующий на заготовку; α – угол наклона боковой грани инструмента; β – угол заострения инструмента; *N* – наклонная поверхность деформации; *F* – калибрующая поверхность деформации; *L* – линия пересечения деформирующих поверхностей; τ – сила трения

Рисунок 1 – Схема взаимодействия инструмента и заготовки

Процессу поперечно-клиновой прокатки присущи различного рода дефекты, которые делятся на наследственные и приобретенные. Наследственные – это дефекты исходного материала, которые не устраняются или устраняются частично. К ним относятся волосяны, раковины, торцевые трещины, которые образуются при рубке заготовок и др. Приобретенные – дефекты, которые образуются в результате клиновой прокатки. К ним относятся дефекты рифления на наклонной деформирующей поверхности инструмента, дефекты в виде торцевых закатов, осевое разрушение материала [2].

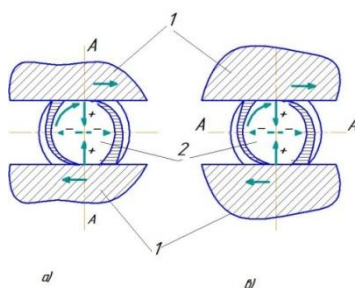
Осевое разрушение стали, как правило, является скрытым, потому является наиболее опасным для дальнейшей эксплуатации деталей, полученных методом клиновой прокатки. Исключением являются крупные полости, которые проявляются в виде бочкообразного вздутия, при этом трещины могут выходить на поверхность прокатанной детали (рисунок 2). Однако, в случае возникновения небольших трещин вздутие поковки незначительно и визуальный осмотр не позволяет обнаружить наличие осевого разрушения материала. Выявление таких трещин и небольших полостей требует

дополнительных методов контроля, таких как ультразвуковая или рентгеновская дефектоскопия.



Рисунок 2 – Осевое разрушение материала с выходом трещин на поверхность прокатанной детали

Процесс осевого разрушения вызван циклическим действием знакопеременных напряжений в осевой части заготовки, который получил название «эффект Маннесмана». При каждом повороте заготовки на 90° в направлении произвольной оси А–А сечения, действующее радиальное напряжение изменяет направление (рисунок 3). Когда ось сечения заготовки А–А перпендикулярна калибрующей поверхности инструмента, в направлении этой оси действует сжимающее напряжение. После поворота заготовки на 90° ось А–А сечения заготовки становится параллельной калибрующей поверхности инструмента, и в направлении этой оси действует уже растягивающее напряжение. Многократное изменение направления действующего напряжения приводит к усталостному разрушению материала в районе оси детали (рисунок 4) [1].



а – ось А–А перпендикулярна основанию инструментов 1;
б – ось А–А параллельна основанию инструментов 1

Рисунок 3 – Направление действия напряжений в области оси заготовки 2 [1]



Рисунок 4 – Осевое разрушение материала

Усталостное разрушение материала вдоль оси, которое возникает в процессе поперечно-клиновой прокатки, происходит при сравнительно малом количестве циклов нагружения, что объясняется «эффектом Баушингера». Данный эффект возникает при повторно-переменных нагрузках, которые создают в материале напряжение $\sigma_{\text{макс}}$ превышающее предел текучести материала $\sigma_T < \sigma_{\text{макс}} < \sigma_B$. При таком нагружении происходит уменьшение предела текучести σ_T в последующем полцикле нагружения, т. е. $\sigma_T^{(1)}$ оказывается ниже исходного, и тем существеннее, чем выше было первоначальное напряжение $\sigma_{\text{макс}}$ (рисунок 5).

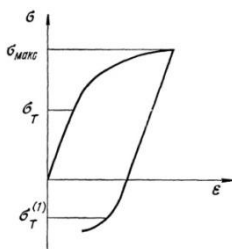


Рисунок 5 – Диаграмма деформирования при повторно-переменном нагружении материала («эффект Баушингера») [3]

На количество циклов нагружения до проявления «эффекта Маннесмана» влияют следующие факторы:

- 1) количество избыточного материала попадающего на калибрующий участок прокатного инструмента;
- 2) наличие несплошности в материале;
- 3) химический состав стали, прочность и морфология отдельных фаз;

- 4) наличие неметаллических включений;
- 5) ориентации зерен;
- 6) температуры деформирования.

Как известно, разрушению материала предшествует зарождение и развитие микротрещин. При прокатке наибольшие растягивающие и сжимающие напряжения возникают в сердцевине прокатываемого изделия. При этом зарождение микротрещин происходит на границах зерен, в результате скопления дислокаций, или вблизи неметаллических включений, служащих преградами для перемещения дислокаций. При дальнейшем повторно-переменном нагружении происходит объединение и рост трещин, что и приводит к образованию осевой полости [4].

Попадание избытка металла на калибрующий участок инструмента проявляется на конечной детали в виде возникновения эллипсности. В случае прокатки заготовки с наличием эллипсности в осевой части возникают дополнительные нагрузки, которые ускоряют процесс усталостного разрушения. Таким образом, можно установить взаимосвязь: чем больше избыток материала попадает на калибрующий участок инструмента, тем меньше циклов нагружения требуется для возникновения трещин.

На рисунке 6 показано развитие трещин сразу в четырех зонах концентрации напряжений. Концентраторами напряжений обычно служат всевозможные несплошности материала (волосовины, раковины), а также неметаллические включения.

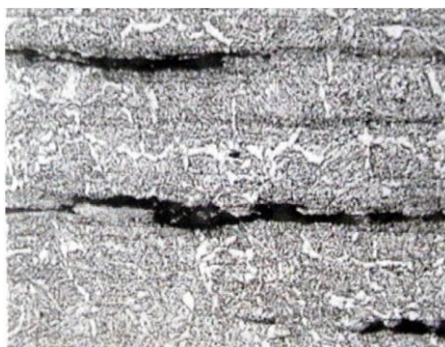
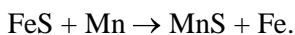


Рисунок 6 – Развитие трещин сразу в нескольких зонах концентрации напряжений конструкционной стали, $\times 100$ [1]

Металлографический анализ прокатанных изделий свидетельствует, что неметаллические включения отрицательно сказываются на ресурсе пластичности осевого участка заготовки. Микротрещины зарождаются вблизи неметаллических включений и располагаются, как правило, на границах зерен.

Проанализируем влияние основных примесей в сталях и неметаллических включений в условиях поперечно-винтовой прокатки. Фосфор, являясь вредной примесью, полностью растворим в феррите, потому и не образует включений, препятствующих перемещению дислокаций и не способствует зарождению трещин при прокатке. Кремний, как и фосфор, растворим в феррите, и не представляет препятствий перемещению дислокаций. Однако при раскислении стали кремний образует оксид кремния SiO_2 , который при кристаллизации может частично оставаться в стали. Наличие оксидов кремния в стали способствует зарождению трещин при повторно-переменном нагружении. При прокатке полукипящих и спокойных сталей наличие таких включений, как известно, значительно меньше, чем в кипящих. Растворимость серы в аустените и феррите практически нулевая, поэтому любое ее количество образует сернистое соединение – сульфид железа FeS , которое входит в состав эвтектики, образующейся при $988\text{ }^\circ\text{C}$. Обычно феррит из сернистой эвтектики $\text{Fe} + \text{FeS}$ объединяется с ферритом основной массы металла, а сульфид железа располагается вокруг зерен. Такое расположение сульфида вредно, так как при горячей обработке давлением сульфид оплавляется, что приводит к образованию надрывов и трещин. Введение в сталь марганца ослабляет вредное влияние серы, так как при введении его в жидкую сталь протекает реакция образования сульфида марганца [5]:



Сульфид марганца плавится при $1620\text{ }^\circ\text{C}$, т.е. при температурах, значительно более высоких, чем температура горячей обработки. При температурах горячей обработки сульфид марганца пластичен и при предварительной прокатке на валковых станах вытягивается в направлении деформации в виде продолговатых включений (рисунок 7).

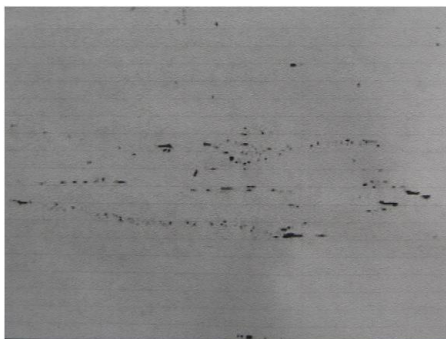


Рисунок 7 – Расположение сульфидов марганца после поперечно-винтовой прокатки [1]

В случае прокатки материала с наличием ликвации сульфидов действие повторно-переменной нагрузки поперек вытянутых сульфидных включений приводит к накоплению дислокаций вблизи таких включений и дальнейшему разрушению материала. Помимо вышеописанных неметаллических включений, в стали могут содержаться различные оксиды, которые хрупки и под действием механических сил крошатся и располагаются в виде цепочек. Заготовки, имеющие оксидные включения, также склонны к образованию осевой полости при приложении знакопеременных нагрузок.

Таким образом, анализ химического состава стали позволяет прогнозировать склонность того или иного материала к образованию осевого разрушения при протекании процесса поперечно-клиновой прокатки. Вместе с тем, число оборотов заготовки в пределах очага деформации, т.е. количество циклов нагружения при поперечной-клиновой прокатке, зависит от геометрических параметров инструмента. Существует два основных метода борьбы с проявлением «эффекта Маннесмана». Первый заключается в изменении интенсивности отвода избыточного металла с калибрующим участком прокатного инструмента с целью уменьшения эллипсности, т.е. уменьшения напряжения в оси заготовки. Второй заключается в раскатке избытка материала при помощи занижения калибрующего участка на величину эллипсности. Варьируя технологическими параметрами поперечно-клиновой прокатки, возможно

добиться устойчивого процесса прокатки без осевого разрушения любой стали или сплава.

Список литературы

1. **Садко, В.И.** Поперечно-клиноватая прокатка: руководство по практическому применению / В. И. Садко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2007. – 176 с.
2. **Клушин, В.А.** Совершенствование поперечно-клиновой прокатки / В.А. Клушин, Е.М. Макушок, В.Я. Щукин. – Минск: Наука и техника, 1980. – 89 с.
3. **Honeycombe, R. W. K.** / The plastic deformation of metals / Москва, 1972.
4. **Трощенко, В.Т.** Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В. Т. Трощенко. – Киев: Наук. думка, 1981. – 344 с.
5. **Гуляев, А.П.** Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

УДК 669-174

М.В. ГОЛЬЦОВА, канд. техн. наук,
Г.И. ЖИРОВ, канд. физ.-мат. наук (БНТУ)

О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА ПРИ ОТЖИГЕ В ВОДОРОДЕ

Авторы различных работ, например, [1], высказывали мнение о том, что введение водорода в металл может вызывать ускорение самодиффузии атомов металла. Для сплавов системы Pd–H (классической модельной системы, исторически используемой для изучения основных закономерностей взаимодействия водорода с металлами [2]) наличие такого явления означало бы снижение температуры начала рекристаллизации нагартованного палладия при его отжиге в водороде. Такой результат представляет интерес, поскольку примеси в металле повышают температуру рекристаллизации. В связи с вы-