

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 621.771.07:621.78.011

Механизм возникновения отслоений на поверхности валков холодной прокатки

Б. А. Брусиловский, А. Я. Шашко

Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, Украина

Исследованы содержание фаз и распределение напряжений (остаточных и контактных) по глубине поверхностного слоя валков холодной прокатки. Материалы исследования использованы для объяснения механизма образования отслоений. Отслоение зарождается в зоне максимальных растягивающих остаточных напряжений на границе микровключений фаз. Эволюции отслоения соответствуют четыре стадии: зарождение микротрещин на глубине; формирование магистральной трещины; стабильное ее развитие и долом. Раскрытие трещины способствуют напряжения растяжения и распад остаточного аустенита под влиянием циклических нагрузок прокатки. Снизить вероятность появления отслоений можно за счет оптимизации режимов термической обработки валков.

Отслоения – наиболее распространенный дефект валков холодной прокатки. По статистике [1] они являются причиной преждевременного выхода из строя валков уже на ранней стадии эксплуатации.

Тема отслоений проходит через многие работы [1–4]. Описывая механизм возникновения этого дефекта, авторы придерживаются точки зрения, впервые высказанной Н. А. Кукло [2] на основании анализа микрорельефа многочисленных осколков, отслоившихся от валков. Однако в модели Кукло имеется недостаток: при рассмотрении эволюции дефекта без внимания остаются такие факторы, как напряженное состояние и фазовый состав, совместное влияние которых и может оказаться решающим.

Цель работы – объяснение механизма зарождения и развития отслоений при эксплуатации валков холодной прокатки на основании исследований особенностей распределения по глубине поверхностного слоя фазового состава, остаточных напряжений и напряжений, возникающих при прокатке.

Сразу же оговоримся, что при анализе причин, приводящих к появлению отслоений, из рассмотрения заведомо исключались экстремально-катастрофические варианты, связанные с грубейшими нарушениями технологии изготовления и эксплуатации валков.

Объектом исследования являлся новый натурный валок производства ЗАО “Ново-Краматорский машиностроительный завод” (диаметр бочки 500 и длина 1680 мм) из стали 9Х2МФ, содержащей (%) 0,90 С; 1,90 Cr; 0,25 Mo; 0,15 V; 0,25 Si; 0,20 Mn.

Остаточные напряжения (сумма тангенциальной и осевой составляющих) определяли рентгенографически по методике [5], используя зондирующие отверстия и наплавленные датчики.

При построении эпюр контактных напряжений (в зоне контакта рабочего и опорного валков) использовались рекомендации, приведенные в работах [3, 4]. Суть методики определения главных нормальных напряжений σ_x , σ_y , σ_z и главного тангенциального напряжения τ_{\max} сводится к расчетным действиям по приближенным известным формулам [4], которые основаны на теории Герца–Беляева о сжатии двух гладких цилиндров бесконечной длины и энергетической теории формоизменения.

Для исследования фазового состава из поверхностного слоя валка электроискровым способом вырезали образец в виде прямоугольного параллелепипеда размером $50 \times 20 \times 10$ мм. В разных точках образца в направлении, которое соответствовало радиальному направлению валка, методами прикладного рентгеноструктурного анализа [6–8] определяли количество остаточного аустенита, цементита и графита. Систему обнаружения фаз низких содержаний использовали для идентификации карбидных фаз [9]. В этих же точках определяли твердость по Роквеллу.

Анализ распределения твердости по глубине поверхностного слоя позволил уточнить геометрические параметры закаленного слоя и участка переходной зоны от закаленного слоя к незакаленному (рис. 1). Первый распространялся на глубину 10 мм, второй – до 35 мм.

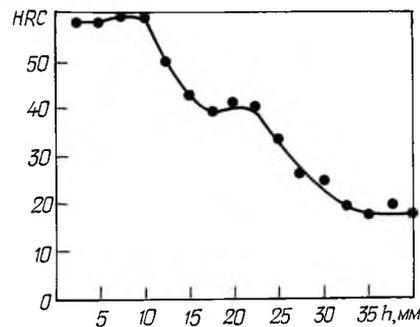


Рис. 1. Распределение твердости HRC по глубине h поверхностного слоя валка.

На рис. 2 приведены кривые, характеризующие особенности распределения фаз в поверхностном слое валка. Экстремальные значения содержания остаточного аустенита обнаруживали дважды: в закаленном слое и переходной зоне. Их происхождение достаточно подробно описано в [6]. Максимум закаленного слоя (20%) соответствует низкоуглеродистой модификации, максимум переходной зоны (16%) – высокоуглеродистой.

На поверхности опытного валка обнаруживается 2% карбида цементитного типа. По мере продвижения в глубину его количество нарастает и достигает наибольшего значения в переходной зоне. Этот максимум является следствием выпадения пробейнитного цементита при реализации промежуточного превращения [7]. Его положению соответствует точка перегиба на кривой распределения твердости (рис. 1). В поверхностном слое валка были идентифицированы другие карбиды: ϵ -карбид, карбиды ванадия и молибдена в закаленном слое; карбид хрома, карбиды ванадия и молибдена в переходной зоне. Суммарное их количество – до 1%.

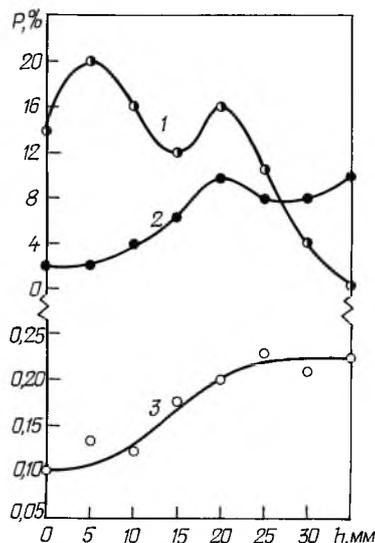


Рис. 2. Распределение содержания фазы P по глубине h поверхностного слоя опытного валка холодной прокатки: 1 – остаточный аустенит; 2 – карбид цементитного типа; 3 – графит.

Отметим также присутствие в хромсодержащей валковой стали графитных образований: в закаленном слое – 0,10%, в переходной зоне – 0,22%.

Таким образом, поверхностный слой валка холодной прокатки – это сложная многофазная система, которая помимо неизбежных неметаллических включений содержит в матрице и другие фазы: две модификации остаточного аустенита, цементит, четыре типа спецкарбидов и графит.

Эпюра распределения остаточных напряжений приведена на рис. 3. Из эпюры следует, что закаленный слой опытного валка находится под действием достаточно высоких напряжений сжатия (до 600 МПа). Снижение их уровня на поверхности валка – результат влияния растягивающих напряжений, неизбежных при шлифовке. Для переходной зоны характерен остро-направленный растягивающий пик (до 500 МПа), на смену которому снова приходят остаточные напряжения сжатия.

Распределение главных нормальных напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, возникающих при контакте рабочего и опорного валков, представлено на рис. 4. В плоскости симметрии, проходящей через линию соприкосновения этих валков, они принимают максимальные значения. Анализ распределения показывает, что поверхностный слой в зоне контакта находится под действием высоких напряжений сжатия, значения которых быстро затухают по мере продвижения в глубину. К такому же заключению приводит анализ распределения максимальных касательных напряжений τ_{\max} в зоне контакта. Они также являются сжимающими с экстремальным значением 460 МПа на расстоянии 5 мм от поверхности.

При эксплуатации в поверхностном слое рабочего валка непрерывно изменяются нагрузочно-разгрузочные ситуации. Если в вертикальной осевой плоскости в местах соприкосновения с опорным валком и прокатываемой лентой это контактное сжатие, то в горизонтальной осевой плоскости действуют растягивающие нагрузки. За полный оборот рабочего валка про-

исходит четырехкратная смена на его поверхности знака нагрузки. Отметим, однако, что несмотря на циклическое контактное нагружение, на поверхности сохраняются суммарные напряжения сжатия. Остаточные напряжения сжатия благоприятно влияют на сопротивление усталости [3], тормозят накопление усталостных изменений в закаленном слое.

Результаты исследования были использованы для объяснения механизма образования отслоений.

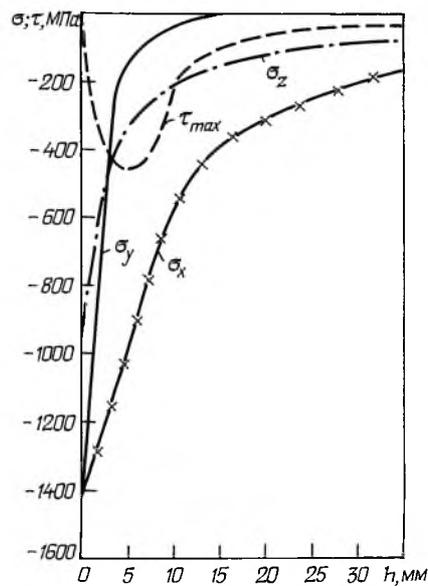
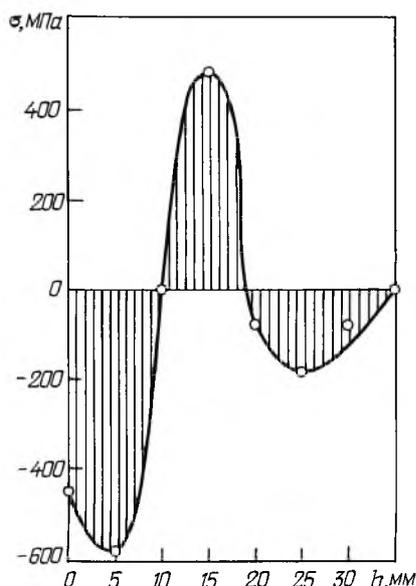


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений σ по глубине h поверхностного слоя опытного вала.

Рис. 4. Распределение контактных напряжений σ и τ по глубине h поверхностного слоя валков холодной прокатки: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – главные нормальные напряжения; τ_{\max} – максимальное касательное напряжение.

Принципиальным является вопрос о месте зарождения отслоения. По мнению Н. А. Кукло [2], отслоение зарождается на поверхности вала. Первичная микротрещина появляется на поверхности или в непосредственной близости от нее, на глубине 0,2–0,3 мм. В дальнейшем трещина распространяется через закаленный слой до некоторой критической глубины (7–17 мм), а затем ее развитие в глубину прекращается, направление распространения изменяется в сторону поверхности.

С нашей точки зрения, такой механизм зарождения и развития отслоений маловероятен. Материалы настоящего исследования свидетельствуют о существовании в закаленном слое рабочих валков достаточно высоких напряжений сжатия, значительное перераспределение которых возможно в результате или многократных перешлифовок, или появления на поверхности серьезных макроповреждений. Микротрещины, появившиеся под влиянием местной перегрузки (“надавы”) или под влиянием перешлифовки (“прижоги”), локализируются в поле высоких сжимающих напряжений, не получая дальнейшего развития.

Картина распределения остаточных напряжений в поверхностном слое может изменяться под влиянием многократных перешлифовок. Выше было показано (рис. 3), что в зоне действия шлифовального круга возникают растягивающие напряжения, снижающие уровень сжатия на 20...30%. Эффект может стать по-особому заметным после многократных перешлифовок и зайти так далеко, что на поверхности изменится знак напряжений. В этом случае любая поверхностная микротрещина может получить дальнейшее развитие, и зарождение отслоения может происходить по схеме Кукло.

Существует и другой аргумент, подтверждающий малую вероятность появления очагов разрушения на поверхности рабочего вала. Известно [10], что пластическая деформация предшествует всякому разрушению, в том числе хрупкому. Закаленный слой с повышенной твердостью и почти отсутствующим ресурсом пластичности малоперспективен для зарождения очагов разрушительного процесса.

На наш взгляд, очаг разрушения зарождается в зоне расположения растягивающего пика остаточных напряжений (рис. 3), на которую распространяют еще свое влияние контактные напряжения σ_x и τ_{\max} (рис. 4). В зоне существует достаточно эффективный режим циклических нагрузок, способный инициировать возникновение усталостного разрушения. Отметим также, что помимо растягивающего пика, способствующего раскрытию трещин, в переходной зоне есть максимальное количество фаз (рис. 2), скопления включений, каждое из которых является потенциальным очагом разрушения.

Механизм зарождения и развития отслоений, как полагаем, протекает в четыре стадии.

На первой стадии (инкубационный период) в переходной зоне под действием циклических нагрузок накапливаются дислокации у микровключений. Роль графитных включений особо подчеркнута в работе [8]. Трещины зарождаются по механизму Зинера–Стро [10]. Их развитие может происходить по схеме Орована или благодаря слиянию полос скольжения по схеме Орлова в результате блокировки дислокаций у препятствий [10].

На второй стадии происходит слияние, укрупнение дислокационных трещин, в результате чего формируется магистральная трещина. Развитию процесса способствуют два фактора: растягивающие остаточные напряжения и распад остаточного аустенита. Его роль подчеркнута во многих работах [1–4]. Однако в закаленном слое распад остаточного аустенита подавляется высокими сжимающими напряжениями. Что касается переходной зоны, то растягивающий пик создает режим “максимального благоприятствования” для распада высокоуглеродистой модификации этой фазы. Появляются продукты распада с увеличенным объемом. Они “раздают” бейнитно-мартенситную матрицу, способствуя тем самым развитию разрушения. У берегов магистральной трещины могут зарождаться ответвления – микротрещины второго порядка.

На третьей стадии идет процесс стабильного, автомодельного развития отслоения. Формируется ступенчато-бороздчатый рельеф полости магистральной трещины. Опуская механизмы зарождения ступенек и борозд (они

достаточно подробно описаны в [1–4, 10]), отметим, однако, что кинетические параметры распространения трещины зависят прежде всего от режима прокатки.

Для четвертой, завершающей стадии характерно нестабильное, ускоренное развитие дефекта. Происходит так называемый долом, и от валака отделяется осколок.

Долому предшествует вздутие поверхности валака, легко обнаруживаемое при перешлифовке. Фотографии вздутий приведены в работе [1]. Осколки имеют толщину 7–17 мм [1–4] и четко выраженный на этой глубине эпицентр разрушения. Эти факторы могут служить дополнительными аргументами в пользу изложенных представлений о “глубинном” механизме зарождения отслоений.

Материалы исследования позволяют сформулировать рекомендации, которые могут оказаться полезными при разработке мер по снижению вероятности образования отслоений. Не преуменьшая роли технологии прокатки, отметим все же особую значимость совершенствования технологии термической обработки.

Закалка и отпуск должны обеспечивать:

наименьший уровень растягивающего пика остаточных напряжений в переходной зоне, рассредоточение зоны растяжения и смещение ее на большую глубину;

наименьшее количество остаточного аустенита в поверхностном слое вплоть до изготовления безаустенитных валков;

увеличение общей глубины закаленного слоя и переходной зоны.

Резюме

Досліджено розподілення фаз та напружень (залишкових і контактних) за глибиною поверхневого шару валків холодної прокатки. Матеріали дослідження використано для пояснення механізму утворення відшарувань. Відшарування зароджується в зоні розтягальних залишкових напружень на межі мікрвовключень фаз. Його еволюції відповідають чотири стадії: зародження на глибині і формування магістральної тріщини, стабільний її розвиток, долом. Розкриттю тріщини сприяють розтягальні напруження та розпад залишкового аустеніту під впливом циклічних напружень прокатки. Знизити ймовірність появи відшарувань можна за рахунок оптимізації режимів термічної обробки валків.

1. *Трейгер Е. И., Приходько В. П.* Повышение качества и эксплуатационной стойкости валков листовых станов. – М.: Металлургия, 1988. – 193 с.
2. *Кукло Н. А.* О механизме возникновения отслоений на поверхности валков холодной прокатки // *Сталь*. – 1964. – № 6. – С. 544 – 547.
3. *Полухин В. П., Николаев В. А., Шульман П. Т. и др.* Надежность и долговечность валков холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1971. – 503 с.

4. *Третьяков А. В., Гарбер Э. А.* Расчет и исследование валков холодной прокатки. – М.: Машиностроение, 1966. – 178 с.
5. *Брусиловский Б. А., Иванов Ф. И.* Применение метода наплавленных датчиков для определения остаточных напряжений в закаленном слое крупногабаритных изделий // Завод. лаб. – 1963. – № 7. – С. 821 – 824.
6. *Брусиловский Б. А., Заика В. Н., Пискарева Т. Н.* Исследование остаточного аустенита в поверхностном слое валков холодной прокатки // Физика металлов и металловедение. – 1989. – 67, вып. 5. – С. 1134 – 1137.
7. *Брусиловский Б. А., Шашко А. Я.* Исследование карбида цементитного типа в поверхностном слое валков холодной прокатки // Металловедение и терм. обраб. металлов. – 1992. – № 11. – С. 2 – 4.
8. *Брусиловский Б. А., Фельдман В. Е.* Графитные включения в поверхностном слое валков холодной прокатки // Сталь. – 1993. – № 6. – С. 59 – 61.
9. *Брусиловский Б. А., Хаев Л. Г.* Рентгеновский качественный фазовый анализ фаз низких концентраций // Завод. лаб. – 1992. – № 9. – С. 34 – 37.
10. *Иванова В. С.* Разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 167 с.

Поступила 07. 09. 99