

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 669.245

## Циклическая прочность деталей с зонами перекрытия, сформированными при обкатывании роликами

В. В. Белозеров, А. И. Махатилова, В. В. Субботина

Национальный технический университет “ХПИ”, Харьков, Украина

*Исследованы остаточные напряжения и циклическая прочность валов с зонами перекрытия, формируемыми при обкатке роликами. Показано, что наибольшее понижение усталостной прочности имеет место при наличии зоны перекрытия с участками, сформированными в результате снижения усилия обкатывания при втором проходе.*

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, циклическая прочность валов, зоны перекрытия.

Проблема повышения прочности, надежности и долговечности ответственных тяжело нагруженных деталей машин из высокопрочных сталей приобретает актуальность в связи с действием повторно-переменных нагрузок, вызывающих усталостные явления.

Среди прогрессивных методов, направленных на увеличение надежности и долговечности таких изделий, особое место занимает упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД) [1]. Благодаря высокой эффективности и технологичности методов ППД повышается резерв качества изделий машиностроения за счет наклепа поверхностного слоя и наведения в нем сжимающих остаточных напряжений [2].

Установлено [3], что, как правило, обкатывание за один проход, при отсутствии перерывов в подаче и необкатанных зон, обеспечивает максимальное повышение циклической прочности [4]. Однако в случае длинномерных деталей или деталей сложной конфигурации, которые невозможно или нецелесообразно обкатывать за один проход, обкатку проводят в несколько этапов. Например, при обкатывании детали с переходными галтелями (типа торсионных валов) наиболее часто применяют обкатывание в два этапа: отдельно обкатываются цилиндрическая часть и галтели. В этом случае неизбежно формируются зоны перекрытия (ЗП) – участки детали, упрочняемые дважды.

В зонах перекрытия всегда имеют место участки, сформированные при нестабилизированном режиме обкатывания, – это участки начала и конца обкатывания за один и два прохода. В этих участках обнаружена [5] неоднородность распределения остаточных напряжений, что в результате оказывает влияние на циклическую прочность деталей.

Цель настоящей работы, исходя из существенного влияния остаточных напряжений на циклическую прочность деталей после ППД, заключалась в детальном исследовании остаточного напряженного состояния в зонах перекрытия, сформированных по различным схемам обкатывания роликами, и выяснении влияния зон перекрытия на циклическую прочность. Остаточное напряженное состояние оценивалось по осевой составляющей остаточных напряжений, которая является определяющей для деталей, работающих на изгиб. Изучалось распределение осевых остаточных напряжений на поверхности вала вдоль его образующей.

Исследования проводили на валах из сталей 30ХГСН2А ( $\varnothing$  30 мм) и 45ХНМФА ( $\varnothing$  48 мм) в высокопрочном состоянии (HRC 50–55). Обкатывание осуществляли на трехроликовом гидравлическом приспособлении при усилии  $P = 10$  кН, подаче  $S = 0,35$  мм/об, скорости обработки 350 об/мин, диаметре ролика 60 мм и радиусе профиля 5 мм.

Остаточные макронапряжения определяли с использованием рентгеновской тензометрии методом многократных наклонных съемок [6]. Рентгеновские съемки осуществляли на дифрактометре типа ДРОН-3 в  $K\alpha$ - $Cr$  излучении. Отражение (211) регистрировалось поточно. Точность определения напряжений была не хуже  $\pm 50$  МПа.

Усталостные испытания проводили по схеме знакопостоянного плоского изгиба с коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0,25$  на пульсаторе МУП-30 с расположением зоны перекрытия в области действия постоянного изгибающего момента. Определяли ограниченный предел выносливости на базе  $10^6$  цикл. При формировании зоны перекрытия обеспечивалось как резкое, так и плавное изменение усилий в начале и в конце обкатывания.

С помощью специально поставленных экспериментов показано, что неоднородность распределения остаточных напряжений в зонах начала и конца обкатывания при первом проходе ролика полностью устраняется обкатыванием при втором проходе. Так, неравномерность распределения остаточных напряжений по поверхности в зонах начала и конца обкатывания [4], в зонах, сформированных без продольной подачи [3], устраняется при втором проходе при тех же режимах обкатывания, при этом предел выносливости соответствует обкатыванию образцов без наличия таких специфических зон. Отметим также, что характер разрушения в этом случае аналогичен разрушению обкатанных образцов: очаг разрушения находится под поверхностью на глубине 2-3 мм (в необкатанных образцах – на поверхности). Полученные данные однозначно свидетельствуют о том, что разупрочняющее действие специфических зон, сформированных при первом проходе, полностью устраняется при втором проходе. Это указывает на достаточно высокую пластичность поверхностного слоя и на формирование поля остаточных напряжений при последнем проходе.

Рассмотрим остаточное напряженное состояние в зонах начала и конца обкатывания при втором проходе на предварительно обкатанной поверхности. На рис. 1 приведено распределение остаточных напряжений на поверхности зоны перекрытия при резком и плавном повышении усилия в начале обкатывания при втором проходе. Видно заметное изменение однородности распределения остаточных напряжений. Еще в большей степени

проявляется неоднородность распределения остаточных напряжений при резком и плавном снижении усилия в конце обкатывания при втором проходе (рис. 2).

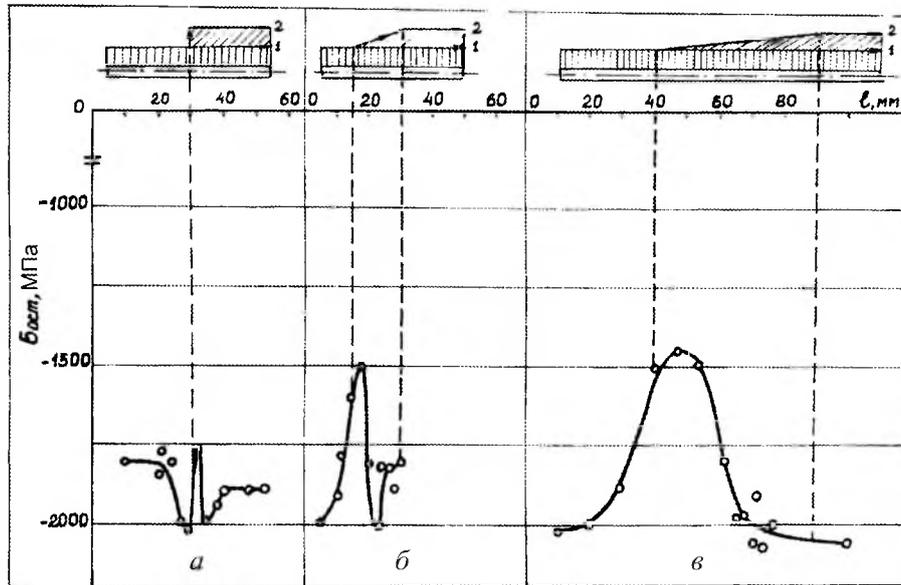


Рис. 1. Влияние скорости повышения усилия при втором проходе на распределение осевых остаточных напряжений вдоль зоны двойного обкатывания, сталь 30ХГСН2А (зоны перекрытия): а – резкое повышение усилия; б, в – плавное повышение усилия (1 – первый проход,  $P_1 = 10$  кН; 2 – второй проход,  $P_2 = 0 \dots 10$  кН).

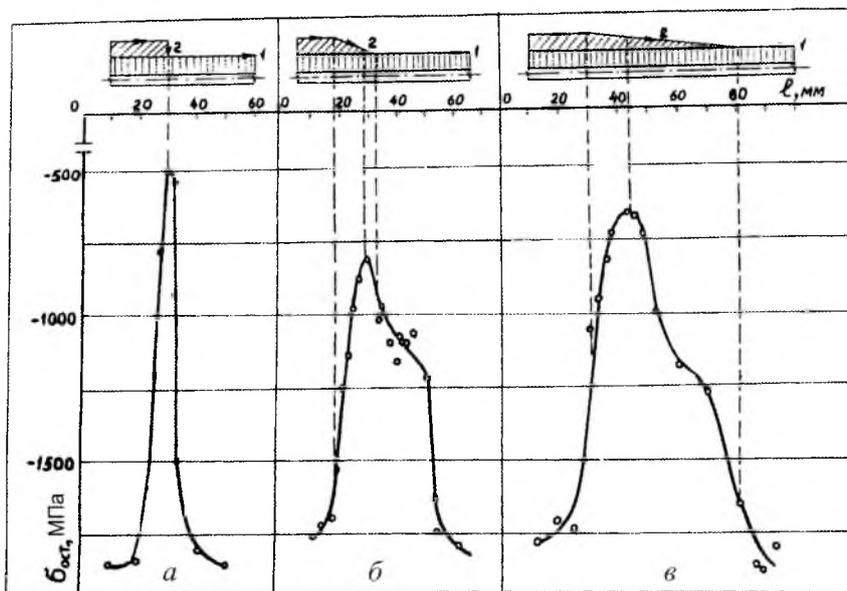


Рис. 2. Влияние скорости снижения усилия при втором проходе на распределение осевых остаточных напряжений вдоль зоны двойного обкатывания, сталь 30ХГСН2А (зоны перекрытия): а – резкое снижение усилия; б, в – плавное снижение усилия (1 – первый проход,  $P_1 = 10$  кН; 2 – второй проход,  $P_2 = 10 \dots 0$  кН).

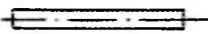
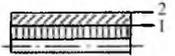
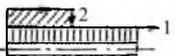
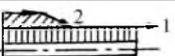
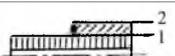
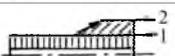
Представляет интерес сопоставить пределы выносливости образцов, упрочненных по приведенным выше схемам (таблица). Оценку проводили в сравнении с исходным (без обкатывания) вариантом и с обкатыванием за один проход с усилием 10 кН. Анализ данных таблицы показал, что:

обкатывание за один проход с усилием 10 кН повышает предел выносливости валов на 60%;

повторное обкатывание с тем же усилием  $P_1 = P_2 = 10$  кН не изменяет величину предела выносливости. Этот результат позволяет рекомендовать такую обработку для устранения каких-либо нарушений, допущенных при первом проходе (обрыв обкатанного слоя, остановка обкатного ролика, обкатывание изношенными роликами);

обкатывание с перекрытиями приводит к снижению предела выносливости: наличие зоны перекрытия, сформированной в результате роста усилия при втором проходе (начало обкатывания), снижает предел выносливости на 6...9%, уменьшение усилия при втором проходе (конец обкатывания) – на 28%. Плавное или резкое изменение усилия при втором проходе отрицательно влияет на предел выносливости. Отметим, что качественно аналогичные результаты получены на валах из стали 45ХНМФА.

**Влияние технологической схемы обкатывания на усталостную прочность валов из стали 30ХГСН2А**

| Технологическая схема   | Вариант обкатки  | $\sigma_{0,25}$ , МПа | $\sigma_{0,25}$ , % |      |
|---|--|-----------------------|---------------------|------|
|  | Поверхностное пластическое деформирование без обкатывания      | 920                   | 100                 | 62,3 |
|  | Обкатывание за один проход, $P = 10$ кН                        | 1480                  | 160,6               | 100  |
|  | Обкатывание за два прохода, $P_1 = 10$ кН; $P_2 = 10$ кН       | 1480                  | 160,6               | 100  |
|  | Обкатывание за два прохода, $P = 10$ кН. Резкое снятие усилия  | 1070                  | 116,2               | 72,4 |
|  | Обкатывание за два прохода, $P = 10$ кН. Плавное снятие усилия | 1070                  | 116,2               | 72,4 |
|  | Обкатывание за два прохода, $P = 10$ кН. Резкий рост усилия    | 1350                  | 147                 | 91,2 |
|  | Обкатывание за два прохода, $P = 10$ кН. Плавный рост усилия   | 1400                  | 152,2               | 94,2 |

Таким образом, при наличии зон перекрытия существенное снижение циклической прочности наблюдается в случае если в зоне перекрытия присутствует участок конца обкатывания при втором проходе. Обращает на себя внимание тот факт, что очаг разрушения, при наличии зон перекрытия, находится на поверхности в зоне начала или конца обкатывания. Различное влияние зон начала или конца обкатывания при втором проходе на предел выносливости обусловлено разными условиями формирования указанных зон. В случае формирования зоны перекрытия в начале обкатывания волна

пластически деформированного материала впереди ролика, перемещаясь, выносится из зоны нагружения к краю образца. В случае формирования зоны перекрытия в конце обкатывания волна пластически деформированного материала остается в зоне нагружения. Наличие этой волны отрицательно влияет на циклическую прочность [7].

## **Выводы**

1. Исследованы остаточные напряжения и циклическая прочность валов с зонами перекрытия, формируемыми при обкатке роликами. Показано, что наибольшее понижение усталостной прочности имеет место при наличии зоны перекрытия с участками, сформированными в результате снижения усилия обкатывания при втором проходе.

2. Экспериментально показано, что в зонах перекрытия отмечаются нарушение однородности распределения остаточных напряжений по поверхности, а также локальные участки с низким уровнем сжимающих остаточных напряжений, где и происходит усталостное разрушение.

3. Для обеспечения равнопрочности валов с зонами перекрытия необходимо предусматривать такую схему обкатывания, при которой в зоне перекрытия исключается наличие участков конца обкатывания.

## **Резюме**

Досліджено залишкові напруження і циклічну міцність валів із зонами перекриття, що формуються при обкатці роликами. Показано, що найбільше міцність від утомленості зменшується за наявності зони перекриття з ділянками, сформованими в результаті зниження зусиль обкатування при другому проході.

1. *Кудрявцев И. В.* Современное состояние и перспективы развития методов повышения прочности деталей машин поверхностным пластическим деформированием // Вестн. машиностроения. – 1970. – № 1. – С. 9 – 13.
2. *Кудрявцев И. В.* Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении. – М.: Машгиз, 1951. – 278 с.
3. *Одинцов Л. Г.* Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
4. *Белозеров В. В., Махатилова А. И., Туровский М. Л., Шифрин А. М.* Остаточные макронапряжения при обкатывании без продольной подачи // Вестн. машиностроения. – 1986. – № 10. – С. 59 – 61.
5. *Белозеров В. В., Легейда С. Н., Махатилова А. И. и др.* Краевой эффект при упрочнении деталей обкатыванием роликами // Там же. – 1993. – № 4. – С. 46 – 48.
6. *Васильев Д. М.* Методика рентгенографического измерения напряжений // Завод. лаб. – 1965. – № 8. – С. 972 – 978.
7. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

Поступила 24. 12. 2003