УДК 669.15:620.178.1

# ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

С. П. РУДЕНКО, С. Г. САНДОМИРСКИЙ
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь

С развитием теории контактных напряжений и появлением новых результатов экспериментальных исследований возрастает актуальность повышения достоверности методик расчета сопротивления контактной усталости. Экспериментальные исследования кинетики усталостного контактного разрушения являются весьма трудной задачей, поэтому корректность разрабатываемых моделей расчета оценивают в сравнении с известными экспериментальными данными. В [1, 2] для оценки глубинной контактной прочности поверхностно упрочненных деталей использован обобщенный критерий Лебедева – Писаренко для структурно неоднородного материала. Отмечено, что предложенная модель позволяет существенно повысить точность расчета на глубинную контактную прочность поверхностно упрочненных зубчатых колес. Корректность предложенной модели оценивали в сравнении с результатами экспериментальных исследований контактной усталости роликов из хромомолибденовой стали [3]. При расчете ролика СА диаметром 120 мм установлено наличие двух опасных зон в упрочненном слое: на глубине 0,2 и 1,3 мм [2] (рис. 1). Согласно экспериментальным данным [3], глубина выкрашивания поверхности ролика СА-120 составляет 0,93....1,85 мм при испытании в течение $1{,}7 \cdot 10^5$ циклов с нагрузкой 1766 МПа. Выкрашивание на глубине 0,2 мм отсутствует.

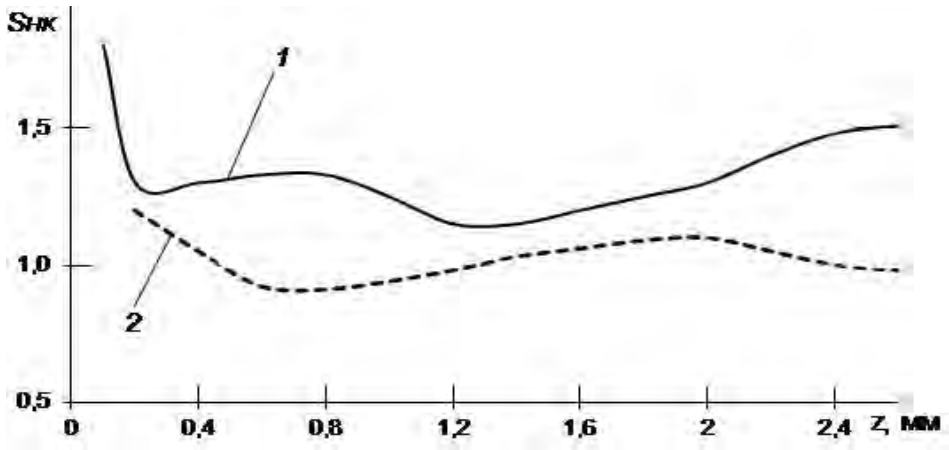


Рис. 1. Коэффициент запаса прочности $S_{HK}$ по глубине упрочненного слоя $Z$ роликов СА-120 [2] (*1*) и СВ-120 [1] (*2*)

При расчете ролика СА-120 по методике [4], разработанной на основе результатов стендовых испытаний зубчатых колес с использованием гипотезы Геста – Мора, установлено, что опасная зона выкрашивания находится на глубине 1,0...1,4 мм (переходная зона с твердостью 440...370 HV), что полностью

согласуется с экспериментальными данными. Опасная зона на глубине 0,2 мм отсутствует ввиду наличия в ней высокой твердости (790 HV).

В [1] приведены результаты расчета ролика СВ-120 при величине контактного напряжения 1864 МПа. Установлено наличие двух опасных зон в упрочненном слое: на глубине 0,7 и 2,6 мм. Согласно экспериментальным данным [3], глубина выкрашивания поверхности ролика СВ-120 составляет 0,39 и 2,29 мм при испытании в течение $3{,}0 \cdot 10^6$ циклов с нагрузкой 1864 МПа.

При расчете ролика СВ-120 по методике [4] получена глубина выкрашивания 1,7...2,2 мм (переходная зона с твердостью 470...370 HV). Опасная зона на глубине 0,39 и 0,7 мм отсутствует. На указанной глубине слоя испытанного ролика твердость составляет 820 и 790 HV, что обуславливает высокие предельные напряжения. Кроме того, из-за высокого значения приведенного радиуса кривизны (30 мм) максимальные эквивалентные касательные напряжения смещаются на глубину слоя до 1,5 мм. Приведенные факторы в совокупности не способствуют зарождению усталостного разрушения на глубине менее 1,5 мм.

Наличие усталостной трещины после стендовых испытаний на глубине 0,39 мм объясняется тем, что при воздействии более высоких циклических контактных напряжений и увеличенных циклах в поверхностных слоях металла ролика СВ-120 происходят необратимые физические процессы [5], приводящие к повышению плотности дислокаций и наклепу поверхностного слоя с высокими остаточными сжимающими напряжениями. Под хрупким наклепанным слоем под действием остаточных растягивающих напряжений происходит разупрочнение металла и возникновение усталостных трещин [6].

Проведенные исследования показывают необходимость учета закономерностей изменения физических свойств металла в процессе циклического нагружения при отработке методик расчета сопротивления контактной усталости поверхностно упрочненных деталей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Короткин, В. И.** К оценке глубинной контактной выносливости эвольвентных передач с поверхностно упрочненными зубьями / В. И. Короткин, Н. П. Онишков // Вестник машиностроения. – 2008. – № 5.– С. 9–14.

2. **Лебедев, С. Ю.** Анализ методик расчета глубинной контактной выносливости / С. Ю. Лебедев // Омский научный вестник. – 2022. – № 2. – С. 43–47.

3. **Фудзита, К.** Влияние глубины цементованного слоя и относительного радиуса кривизны на долговечность при контактной усталости цементованного ролика из хромомолибденовой стали / К. Фудзита, А. Иосида // Конструирование и технология машиностроения. – 1981. – № 2. – С. 115–124.

4. **Руденко, С. П.** Особенности расчета зубчатых колес трансмиссий на глубинную контактную выносливость / С. П. Руденко, А. Л. Валько // Вестник машиностроения. – 2015. – № 11. – С. 5–11.

5. **Иванова, И. С.** Природа усталости металлов / И. С. Иванова. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.

6. **Пинегин, С. В.** Контактная прочность и сопротивление качению / С. В. Пинегин. – 2-е изд., доп. – М.: Машиностроение, 1969. – 244 с.