

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ, КАЧЕСТВА И РИСКА ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

За последние десятилетие специалисты производственного объединения «ГОМСЕЛЬМАШ» создали целый ряд современных высокопроизводительных кормоуборочных, свеклоуборочных, сеноуборочных и, наконец, зерноуборочных машин и комбайнов. И теперь объединение вступило в особую полосу борьбы за обеспечение высокого уровня их качества и надежности, чтобы удовлетворять жестким требованиям рынка.

В ряде случаев зубчатые зацепления оказались «узким местом» в обеспечении надежности машин. В связи с этим выполнен комплекс работ, направленных на повышение качества и следовательно, снижения риска применения материалов для зубчатых колес.

Применительно к зубчатым зацеплениям номенклатуры ПО «ГОМСЕЛЬМАШ» был создан специальный стенд УИМ, для которого разработана оригинальная схема испытаний зубчатых зацеплений (рисунок 1). Любое прямозубое зубчатое зацепление моделирует образец 1 и контрообразец 3 (ролик). Ширина зуба соответствует ширине ролика, а радиус  $R$  на образце моделирует радиус перехода зуба в венец колеса.

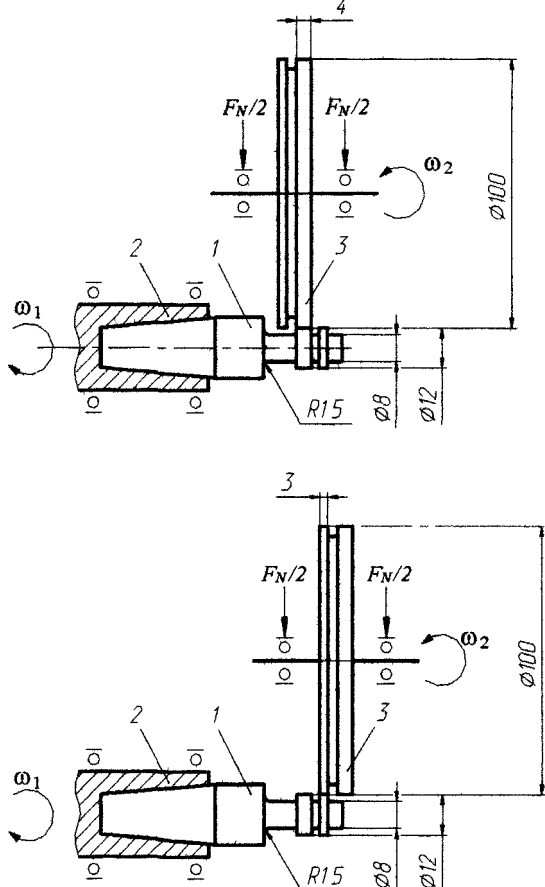


Рисунок 1 – Модель зубчатых зацеплений для шестерен № 4 и № 11 коробки передач ПК.

На рисунке 1 представлена конкретная модель тех зубчатых зацеплений коробки передач 013500, которые являются

наиболее нагруженными и по которым в прошлые годы ПО «ГОМСЕЛЬМАШ» имел наибольшее число рекламаций. Модель создана на основе статистической теории подобия усталостного разрушения Серенсена-Когаева.

Используя стандартные методики, были получены кривые усталости для шлифованных образцов сталей 25ХГТ и 18ХГТ после цементации (рисунок 2). Оказалось, что в результате детерминированных экспериментов различие свойств этих сталей представляется практически несущественным. Это обстоятельство послужило основанием в ряде случаев замены стали 25ХГТ сталью 18ХГТ при изготовлении зубчатых колес. Однако замена привела к появлению неожиданных рекламаций по надежности зубчатых колес. И только статистические испытания позволили выявить, что качество исследованных сталей по важнейшим критериям работоспособности значительно различаются.

Выполнен большой комплекс статистических испытаний материалов для зубчатых колес на моделях (см. рисунок 1). Модели изготовлены из широко применяемых сталей 18ХГТ и 25ХГТ по технологии производства зубчатых колес, принятой в ПО «ГОМСЕЛЬМАШ». На рисунке 3 приведены основные результаты испытаний для шлифованных (после цементации) моделей. Из этого рисунка следует вывод, что сопротивление изгибной усталости стали 18ХГТ существенно меньше, чем стали 25ХГТ в области малых вероятностей. Следовательно, риск применения стали 18ХГТ заведомо больший, чем риск применения стали 25ХГТ. Данные количественного анализа приведены в таблице 1 и на рисунке 4.

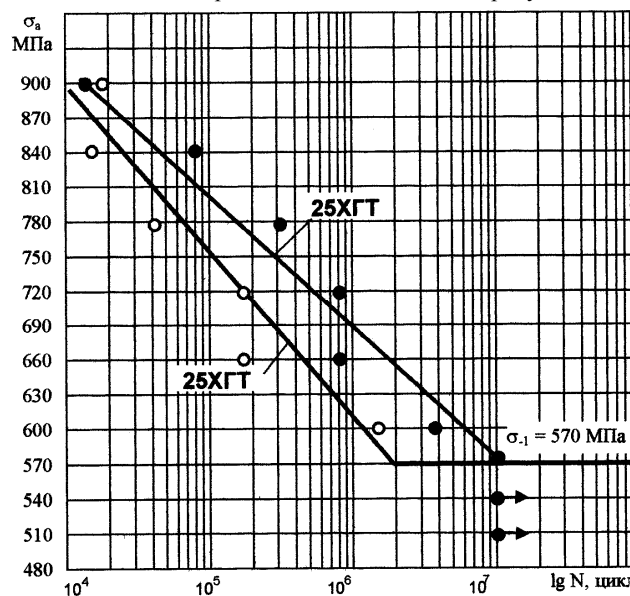


Рисунок 2 – Кривые механической усталости сталей 18ХГТ и 25ХГТ.

Методика оценки статистических показателей качества и риска изложена в работах [1,2].

По данным таблицы 1 и рисунка 4 можно сделать следующие основные выводы:

- если для стали 25ХГТ (шлифованные модели) установ-

Значение предела выносливости		Среднеквадратическое отклонение $S_{\sigma_{-1}}$ , МПа	Статистические показатели		Категории качества		
Нормативное $\sigma_{-1}^*$ , МПа	Среднее $\bar{\sigma}_{-1}$ , МПа		Качества $P(x)$	Риска $[\rho(x)]$	Высшая	Первая	Вторая
<b>25ХГТ</b>							
<u>560</u> 360	<u>579</u> 462	<u>9,2</u> 48,0	<u>0,9805</u> 0,9832	<u>0,0198</u> 0,0171	-	-	X
<u>557</u> 350			<u>0,9916</u> 0,9902	<u>0,0085</u> 0,0099	-	X	-
<u>555</u> 335			<u>0,9954</u> 0,9959	<u>0,0046</u> 0,0041	X	-	-
<b>18ХГТ</b>							
При нормативных требованиях таких же, как и для стали 25ХГТ							
<u>560</u> 360	<u>567</u> 430	<u>13,1</u> 47,0	<u>0,7037</u> 0,9318	<u>0,422</u> 0,0732	Недопустимое нарушение качества		
<u>557</u> 350			<u>0,7774</u> 0,9803	<u>0,288</u> 0,0201			
<u>555</u> 335			<u>0,8209</u> 0,9784	<u>0,219</u> 0,0221			
При сниженных нормативных требованиях по сравнению со сталью 25ХГТ							
<u>540</u> 350	<u>567</u> 430	<u>13,1</u> 47,0	<u>0,9803</u> 0,9803	<u>0,0201</u> 0,0201	-	-	X
<u>535</u> 320			<u>0,9927</u> 0,9904	<u>0,0073</u> 0,0097	-	X	-
<u>530</u> 305			<u>0,9976</u> 0,9961	<u>0,0024</u> 0,0039	X	-	-

Примечание: над чертой приведены значения для шлифованных, под чертой – для нешлифованных моделей.

ливают нормативные значения предела выносливости 560, 557 либо 555 МПа, то обеспечиваются соответственно вторая, первая и высшая категория качества материала;

- для нешлифованных моделей из стали 25ХГТ соответствующие нормативные значения должны быть снижены до 360, 350 и 335 МПа, если требуется практически сохранить уровень риска применения материалов;
- если для стали 18ХГТ (шлифованные и нешлифованные модели) сохранить нормативные требования, принятые для стали 25ХГТ, то риск ее применения возрастает более чем в 20 раз и, следовательно, становится недопустимым;
- качество стали 18ХГТ становится приемлемым, если нормативные значения предела выносливости снижены до 540-530 МПа.

Таким образом, для высоконагруженных зубчатых колес замена стали 25ХГТ на 18ХГТ недопустима, однако для менее нагруженных передач такая замена возможна без снижения долговечности.

Применительно к номенклатуре зубчатых колес, изготавливаемых ПО «ГОМСЕЛЬМАШ», разработан алгоритм управления их качеством. Он базируется на корреляционной связи пределов контактной и механической выносливости сталей 18ХГТ и 25ХГТ и их твердостью с учетом нормативной характеристики «предел выносливости - риск применения» (рисунок 4). Для реализации указанного алгоритма устанавливается нормативная процедура определения и анализа твердости материала натуральных зубчатых колес.

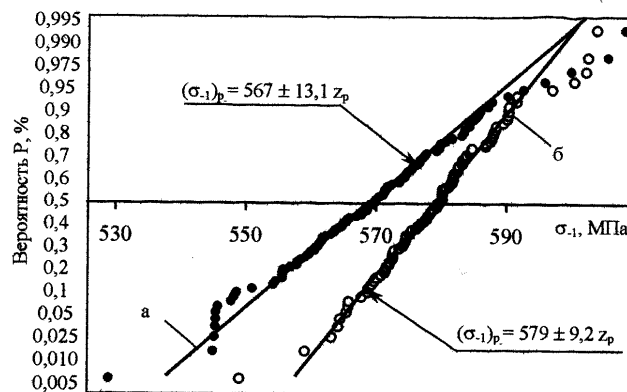


Рисунок 3 – Эмпирические функции распределения пределов выносливости сталей 18ХГТ (а) и 25ХГТ (б) (шлифованные образцы).

Предложена простейшая связь между риском и вероятностью  $P(\sigma_{-1})$  усталостного повреждения зубчатых колес

$$\rho(\sigma_{-1}) = f(k_\rho) \cdot P(\sigma_{-1}),$$

где  $f(k_\rho)$  - переходная функция. Для исследованных условий  $f(k_\rho) = 500$ .

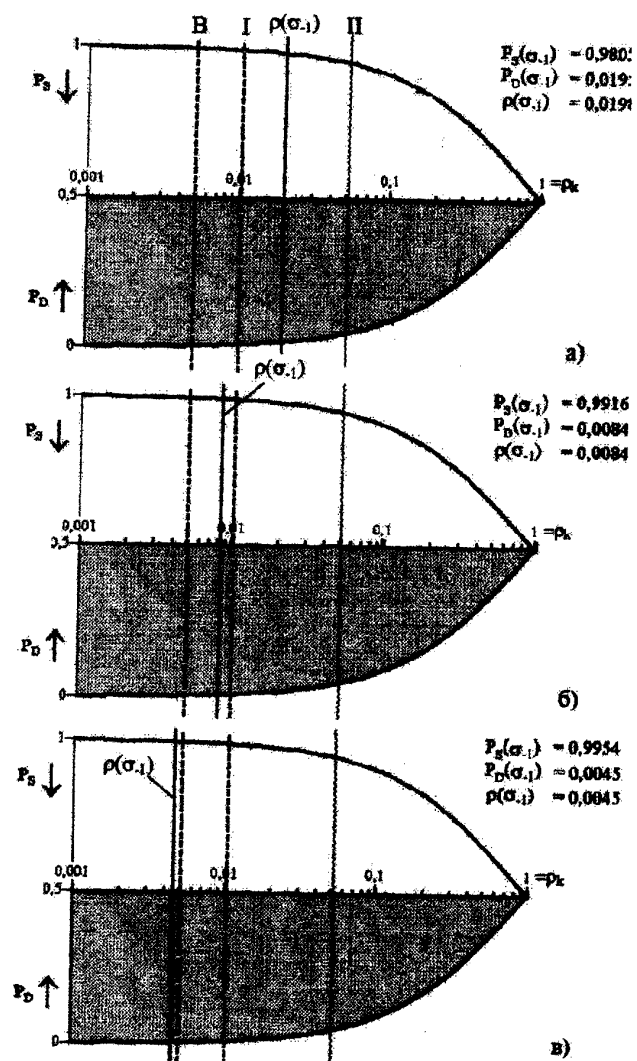


Рисунок 4 – Оперативные характеристики риска  $\rho(\sigma_{-1})$

для стали 25ХГТ, при  $\sigma_{-1}^* = 560$  МПа (а), 557 МПа (б) и 555 МПа (в); В, I, II – нормативные значения риска, соответствующие высшей, первой, второй категории качества.

В таблице 2 приведены оценки  $P(\sigma_{-1})$  по известным показателям риска  $\rho(\sigma_{-1})$  для шлифованных зубчатых колес стали 25ХГТ из расчета, что в эксплуатации находится 100 тыс. колес. Там же приведено прогнозируемое количество ( $n$ ) случаев преждевременного усталостного повреждения колес за установленный технический ресурс ( $2 \cdot 10^7$  циклов).

Таблица 2

Категория качества	$\rho(\sigma_{-1})$	$P(\sigma_{-1})$	$n$
В	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	1
I	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-5}$	2
II	$5.3 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	11

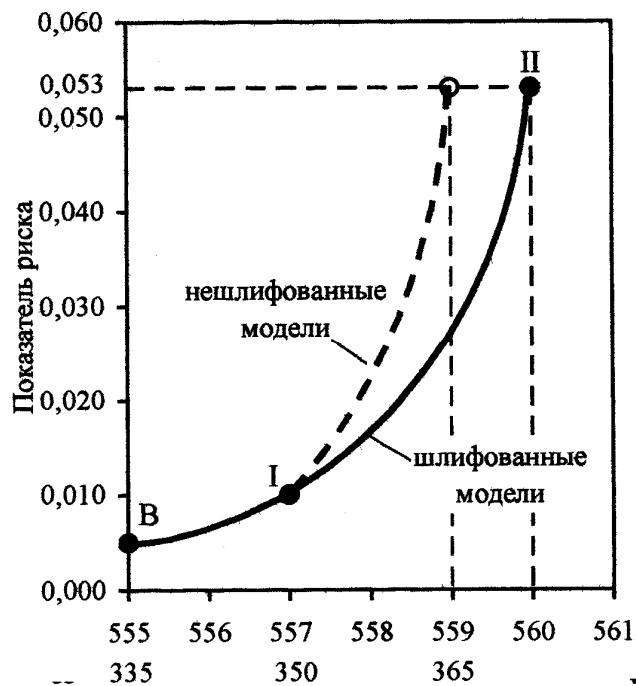


Рисунок 5 – Нормативная характеристика риска применения стали 25ХГТ для изготовления зубчатых колес номенклатуры ПО «ГОМСЕЛЬМАШ» (по предельным напряжениям: верхняя шкала для стали 25ХГТ, нижняя для стали 18ХГТ).

Выполнен комплекс стендовых испытаний коробки ПКК 135, зубчатые колеса которой изготовлены с учетом рекомендаций данной работы. Испытания показали, что долговечность коробки передач вполне соответствует требованиям эксплуатации.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Сосновский Л. А., Жмайлик В. А. Показатель качества материалов по механическим свойствам и его применение// Заводская лаборатория. - 1999. - № 3. - С. 36-40.
2. Жмайлик В. А. К оценке качества силовых систем по критериям сопротивления износо-усталостным повреждениям// Заводская лаборатория. - 1999. - № 4. - С. 55-58.