

1st International Conference - Reliability and Durability
of Machines and Machinery Systems in Mining
1986 JUNE 1-18 SZCZYRK, POLAND

Михал ПЛЮХ

Силезский политехнический институт
Гливице, ПНР

Зыгмунт КЕМПНЫ

НИИ "REDOR"

Бельско-Бяла, ПНР

УСТАЛОСТНАЯ ВЫНОСЛИВОСТЬ G_{Flim} МАРОК СТАЛИ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Резюме. В докладе представлены результаты испытаний, целью которых было определение усталостной выносливости на изгиб зубьев зубчатых колес, изготовленных из различных марок стали. В результате анкетирования производителей зубчатых колес в ПНР для испытаний были отобраны следующие марки стали: 18ХГТ, 20ХНМ (8620Х), 40ХМ и 15ХН. Испытанию подвергались зубчатые колеса, вид и размеры которых совпадали с рекомендациями Частичной Комиссии Стандартизации СЭВ - РС 4489-74. Зубчатые колеса испытывались на стенде системы крутящей мощности. Для определения усталостной выносливости зубьев на изгиб применен метод ускоренных испытаний на базе ЛОКАТИ. Перед началом испытаний зубчатые колеса были подвергнуты разным способам термо-, термохимической и чистой обработки. Так:

- зубчатые колеса из стали марки 20ХНМ поддавались науглероживанию, индукционной закалке с отпуском, а в качестве чистой обработки применялись шлифование и шевингование;
- зубчатые колеса из стали марки 40ХМ поддавались индукционной закалке или закалке с отпуском и шлифованию;
- зубчатые колеса из стали марок 18ХГТ и 15ХН поддавались науглероживанию с азотированием, разным вариантам закалки и шлифованию.

После опытов на усталостную изгибную выносливость все зубчатые колеса были подвергнуты исследованиям, связанным с металлографической оценкой.

ВСТУПЛЕНИЕ

Зубчатые передачи имеют множество особенностей, однако внимание следует обратить на:

- максимальную расчетную межзубную нагрузку, определяемую с точки зрения допустимых напряжений в ноже зуба,

- выносливость ножи зуба в качестве свойства для перекесения нагрузки.

О перенесении зубчатой передачей нагрузки свидетельствует, кроме всего прочего, выносливость использованного материала. Значить с усовершенствованием конструкции зубчатой передачи связана проблема выбора материала для зубчатых колес и технологии их изготовления, позволяющей оптимально использовать потенциальные возможности материала.

Не смотря на то, что длительные испытания привели к определению некоторых критериев выбора материалов и технологий изготовления зубчатых колес, проблема все-таки остается открытой.

ПРОБЛЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ

Выносливость зубчатых колес зависит, как известно, от многих факторов, например, марки материала, вида заготовки, химического состава материала, термической и термохимической обработок, технологии изготовления зубьев, внутренних напряжений и т.д. Числовые значения этих факторов используются в широком диапазоне.

Производством зубчатых колес в ПНР занимается около 100 предприятий, выпускающих ежегодно приблизительно 22 млн. штук. Анализ состояния продукции зубчатых колес показал, что они изготавливаются приблизительно из двадцати марок стали путем использования разных способов обработки резанием и термообработки. Результатом этого, к сожалению, является нерациональное использование сырья и энергии. По сравнению с другими странами в ПНР на изготовление зубчатого колеса идет большее количество материала, следствием чего является увеличение габаритов зубчатой передачи.

К сожалению, в имеющейся литературе очень мало информации о числовых значениях выносливости марок стали, используемых на зубчатые колеса, и о методах термо- и термохимической обработки этих материалов. А ведь такие данные могли бы быть непосредственно использованы конструкторами. Не проводилось также значительных исследований надежности эксплуатируемых зубчатых передач.

На основании опыта можно допустить, что огромное количество выпускаемых ежегодно в ПНР зубчатых колес является не только следствием роста промышленной потребности, но и малой степенью их надежности.

В случае проектирования и конструирования зубчатых передач конструктору приходится принимать решения, которые впоследствии не создают целостности. Одной из причин этого является отсутствие точных данных, касающихся выносливости материалов для зубчатых колес. Значения выносливости, взятые из опубликованных стандартов других стран, ведут к нерациональному использованию материалов страны.

Факторов, влияющих на прочность и надежность зубчатых колес, много, и поэтому при информационных неточностях трудно определить фактор безопасности.

А при неправильно определенном факторе безопасности либо незаконно используются материалы и энергия, либо уменьшается надежность зубчатых передач.

Значит существует необходимость разработки соответствующих стандартов ПНР, касающихся выносливости и предельных нагрузок зубчатых передач, а также выносливости марок стали для изготовления зубчатых колес. С этой целью по поручению Комитета Стандартизации ПНР проведены исследования, касающиеся подбора марок стали для испытаний с последующим проведением опытов выносливости, связанных с металлографической оценкой, в результате которых получены оптимальные параметры термо- и термохимической обработки зубчатых колес.

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты опытов свидетельствуют, что усталостная выносливость зубчатого колеса значительно меньше усталостной выносливости материала, из которого выполнено это колесо. Например, наши опыты показали, что отношение усталостной выносливости ножки зуба σ_{Flim} зубчатого колеса из стали марки 18ХГТ к усталостной выносливости Z и прочности R_m этой стали приблизительно можно представить следующим образом:

$$\sigma_{Flim} : Z : R_m = 1 : 2 : 4$$

Исследование усталостной выносливости зубьев зубчатых колес основано на числовом способе оценки натяжения, которое возникает в критическом месте ножки зуба [3].

Геометрия и размеры зубчатого колеса были подобраны таким образом, что данное колесо можно было принять за колесо-образец. В этом случае геометрический надрез и величина зуба минимально влияют на свойства материала, касающиеся выносливости.

Колеса-образцы подбирались таким образом, чтобы место излома находилось в ножке зуба. Основные геометрические размеры зуба колеса-образца следующие: $z_1 = 27$, $m_n = 4$ мм, $\beta = 0^\circ$, $b = 16$ мм, а его вид и остальные размеры совпадают с рекомендацией Постоянной Комиссии Стандартизации СЭВ - РС 4489-74 [1]

Испытывались 9 партий колес-образцов, изготовленных из разных марок стали и включающих от 6 до 11 штук. Для каждой партии применялись различные способы термо- и термохимической обработки, а также чистовой обработки. Закалка колес-образцов всех партий проводилась индукционным способом. Экземпляры каждой партии были изготовлены из стали одной выплавки. Иными словами:

I партия колес-образцов изготовлена из стали марки 18ХГТ. Зубья колес с целью увеличения прочности их поверхности поддавались науглероживанию с азотированием, затем закалке, низкому отпуску и шлифованию.

II и III партии колес-образцов изготовлены из стали марки 20ХНМ. Зубья колес науглероженные, поверхностно-закаленные и шлифованные.

- IV и V партии колес-образцов изготовлены из стали марки 20ХНМ. Зубья колес шевингованные, науглероженные и поверхностно-закаленные.
- VI партия колес-образцов изготовлена из стали марки 40ХМ. Зубья колес поверхностно-закаленные, улучшенные и шлифованные.
- VII партия колес-образцов изготовлена из стали марки 40ХМ. Зубья поверхностно-закаленные и шлифованные.
- VIII партия колес-образцов изготовлена из стали марки 15ХН. Зубья колес поддавались науглероживанию с азотированием в температуре 930°C , затем была проведена их вдвухкратная закалка, низкий отпуск и шлифование.
- IX партия колес-образцов изготовлена из стали марки 15ХН. Зубья колес были подданы науглероживанию с азотированием в температуре 860°C , затем проведена их закалка, низкий отпуск и шлифование.

Все исследованные шестерни колес-образцов взаимодействовали с колесами, число зубьев которых $z_2 = 35$; причем каждая пара колес была изготовлена из одного материала и поддавалась одинаковой обработке.

Перед началом испытаний каждая пара колес-образцов подвергалась приработке при нагрузке 25-35% от нагрузки, соответствующей выносливости σ_{Flim} . Приработка заканчивалась после распространения пятна контакта на полную длину зуба, не превышая 10^6 циклов перемен нагрузки.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Многие исследования свидетельствуют о том, что не существует материалов, обладающих неограниченной усталостной выносливостью. Именно поэтому целью наших опытов было определение числовых значений выносливости ножки зуба σ_{Flim} , дефиниция которой следующая:

Выносливость ножки зуба σ_{Flim} на базе испытаний N_{Flim} - это максимальное напряжение, которое по проведению N_{Flim} циклов не приводит к излому зубьев. База испытаний для стали: $N_{\text{Flim}} = 10 \times 10^6$ циклов.

Колесы-образцы испытывались на стенде системы крутящей мощности [2], применяя метод ускоренных испытаний на базе ЛОКАТИ [3] при использовании гипотезы Пальмгрена-Минера. Достоинство этого метода состоит в возможности определения выносливости по значительно меньшему количеству образцов, чем при использовании других методов.

После окончания опытов относительно каждого экземпляра был проведен осмотр внешних поверхностей изломов и рабочих поверхностей зубьев. Затем поверхности зубьев подвергались шлифованию, полированию и травлению 4% спиртовым раствором азотной кислоты. Подготовленные таким образом поверхности наблюдались под микроскопом с увеличением в 500 и 100 раз. Проведено также измерение твердости рабочих поверхностей и сердцевины зубьев.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты испытаний представляет таблица 1.

Виды кривых усталостной выносливости для исследованных случаев показаны на рис. 1.

Результаты исследований показали:

- усталостная выносливость ножки зуба σ_{Flim} зависит в значительной степени от способа и параметров термохимической обработки. Наивысшее значение σ_{Flim} получено в результате науглероживания с азотированием;
- усталостная выносливость σ_{Flim} зависит от способа проведения закалки. Закалка, проведенная способом "впадина за впадиной", дает лучшие результаты, чем закалка способом "зуб за зубом";
- усталостная выносливость σ_{Flim} зависит также от метода чистой обработки. В случае стали марки 20ХНМ левингование снижает значение σ_{Flim} на 12-18% по отношению к шлифованию;
- наивысшее значение усталостной выносливости σ_{Flim} получено в случае стали марки 15ХМ, благодаря соответственно подобранным термо- и термо-химической обработкам;
- сталь марки 20ХНМ обладает лучшими числовыми значениями σ_{Flim} , чем сталь марки 18ХГТ, однако характеризуется более низким качеством;
- применение индукционной закалки с отпуском повышает значение σ_{Flim} по сравнению с просто индукционной закалкой. Например, в случае стали марки 40ХМ выносливость σ_{Flim} повышается на 25%.
Отмечена также большая чувствительность этой стали на динамические и ударные нагрузки;
- полученные значения твердости сердцевини зубьев во всех партиях были в пределе 30-41 по Роквеллу, а значения твердости рабочей поверхности зубьев - от 56 (в случае стали марок 18ХГТ, 40ХМ) до 67 (в случае стали марки 15ХН).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рекомендация СБВ № РС 4489-74. Передачи зубчатые цилиндрические. Методы испытаний на контактную и изгибную выносливость.
- [2] Плях М.: Определение выносливости стали σ_{Flim} и σ_{Flim} ускоренным методом. III Национальная научно-техническая конференция "Зубчатые передачи" 86". Варна 1985.
- [3] Locati L.: Le prove di fatica come ausilio alla progettazione ed alla produzione. Metallurgia Italiana 1962.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan ADAMCZYK

Wpłynęło do Redakcji: marzec 1986 r.

Таблица 1

Результаты испытаний колес-образцов

№№ партии	оыга	Материал	Термохимическая обработка	Термо- обработка	Чистовая обработка	Уровни наклонного участка кривой $\sigma-N$	МПа
I	1976/1	18ХГТ	Науглероживание с азотированием	Индукционная закалка с отпуском	Шлифование	$\sigma. N^{0,11} = 10^{3,29}$	356
II	1978/1	20ХН	Науглероживание	"	"	$\sigma. N^{0,06} = 10^{3,01}$	393
III	1978/2	20ХН	"	"	"	$\sigma. N^{0,04} = 10^{2,92}$	369
IV	1979/1	20ХН	"	"	Шевнигова- ние	$\sigma. N^{0,07} = 10^{3,05}$	326
V	1979/2	20ХН	"	"	"	$\sigma. N^{0,07} = 10^{3,03}$	325
VI	1980/1	40ХМ	"	Индукционная закалка с от- пуском	Шлифование	$\sigma. N^{0,09} = 10^{3,14}$	334
VII	1981/1	40ХМ	"	Индукционная закалка	"	$\sigma. N^{0,15} = 10^{3,42}$	261
VIII	1985/1	15ХН	Науглероживание с азотированием	Двукратная закалка с отпуском	"	$\sigma. N^{0,08} = 10^{3,21}$	443
IX	1985/2	15ХН	"	Закалка с отпуском	"	$\sigma. N^{0,12} = 10^{3,47}$	417

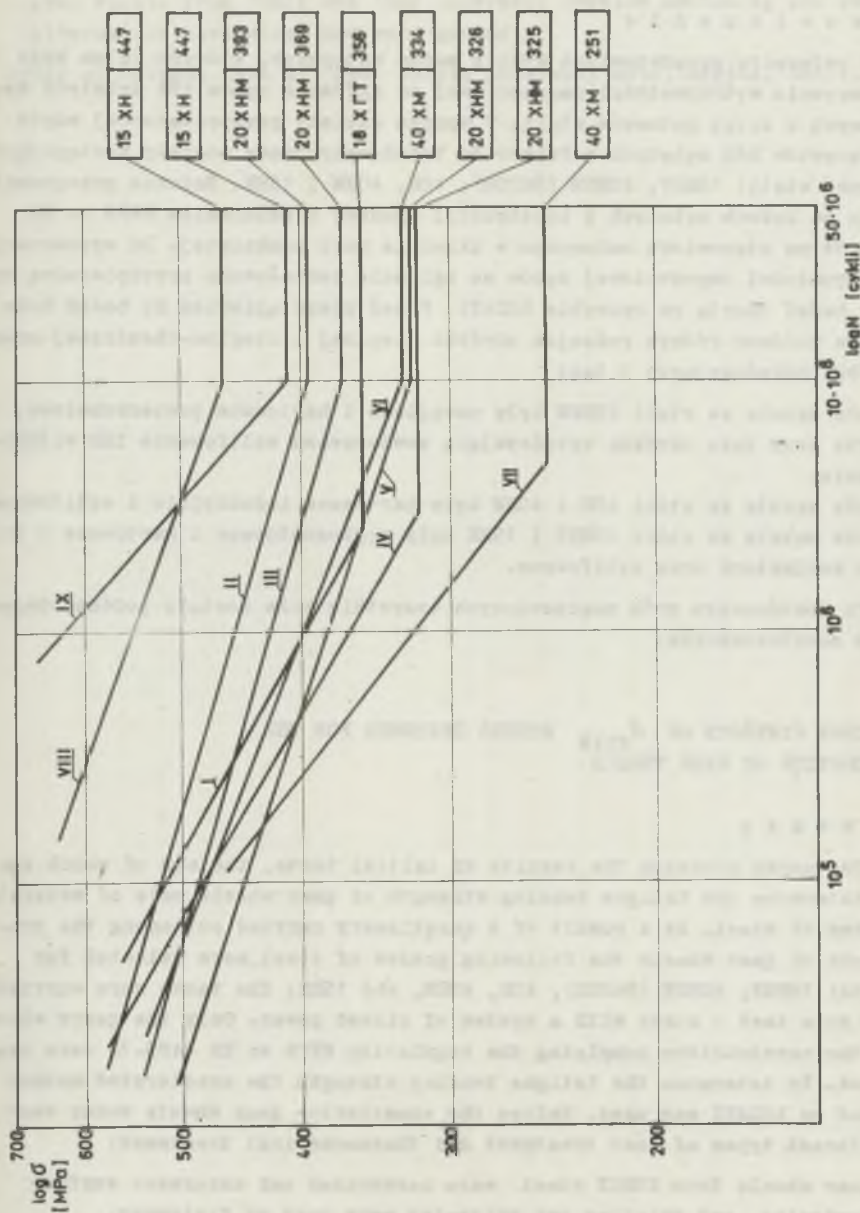


Рис. 1. Диаграммы усталостной выносливости исследованных марок стали

Rys. 1. Wykreśy zmęczeniowe badanych stali

WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA σ_{FLIM} STALI PRZEZNACZONYCH
DO PRODUKCJI KÓŁ ZĘBATYCH

S t r e s z c z e n i e

W referacie przedstawiono wyniki badań wstępnych, których celem było wyznaczenie wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie zębów kół zębatach wykonanych z kilku gatunków stali. W wyniku ankiety przeprowadzonej wśród producentów kół zębatach w Polsce do badań wytypowane zostały następujące gatunki stali: 18HGT, 20HNM (8620H), 40H, 40HM i 15HN. Badania przeprowadzono na kołach zębatych o konstrukcji zgodnej z zaleceniem RWPG nr RS 4489-74 na stanowisku badawczym w układzie mocy zamkniętej. Do wyznaczania wytrzymałości zmęczeniowej zębów na zginanie zastosowano przyspieszoną metodę badań opartą na sposobie LOCATI. Przed przystąpieniem do badań koła zębate poddano różnym rodzajom obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej oraz obróbki wykańczającej i tak:

- koła zębate ze stali 20HNM były nawęglane i hartowane powierzchniowo, przy czym jako obróbkę wykańczającą zastosowano szlifowanie lub wiórkowanie,
- koła zębate ze stali 40H i 40HM były hartowane indukcyjnie i szlifowane,
- koła zębate ze stali 18HGT i 15HN były węglaozotowane i hartowane w kilku wariantach oraz szlifowane.

Po zakończeniu prób zmęczeniowych wszystkie koła zostały poddane badaniom metaloznawczym.

FATIGUE STRENGTH OF σ_{FLIM} STEELS DESIGNED FOR THE
PRODUCTION OF GEAR WHEELS

S u m m a r y

The paper presents the results of initial tests, the aim of which was to determine the fatigue bending strength of gear wheels made of several grades of steel. As a result of a questionnaire carried out among the producers of gear wheels the following grades of steel were selected for tests: 18HGT, 20HNM (8602H), 40H, 40HM, and 15HN. The tests were carried out on a test - stand with a system of closed power. Only the gears wheel of the construction complying the regulation RWPG ur RS 4489-74 were examined. To determine the fatigue bending strength the accelerated method based on LOCATI was used. Before the examination gear wheels under went different types of heat treatment and thermochemical treatment:

- gear wheels from 20HNM steel were carburized and underwent surface hardening, and grinding and whitening were used as finishing,

- gear wheels from 40H and 40HM were hardened inductively and ground,
- gear wheels from 19HGT and 15HN underwent cyanide hardening and several alternative hardenings and were ground.

After of fatigue test all gear wheels underwent metallurgical tests.