

В. С. Кравчук, к.т.н., А. Ф. Дащенко, д.т.н., А. М. Лимаренко, к.т.н.

Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса

## ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТА УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Рассмотрены особенности влияния остаточных напряжений и механических свойств металла упрочненного слоя на уставившую прочность гладких деталей и деталей из концентраторами напряжений. Показана необходимость дифференцированного учета остаточных напряжений и механических свойств металла упрочненного слоя для обеспечения нужного эффекта упрочнения. Предложен графоаналитический метод определения эффекта упрочнения, который позволяет на стадии проектирования и доводки опытного экземпляра машины обоснованно выбрать нужное значение коэффициента технологического упрочнения.*

**Ключевые слова:** *поверхностное упрочнение, эффект упрочнения, графоаналитический метод.*

### Введение.

Применение различных методов поверхностного упрочнения деталей машин способствует существенному повышению сопротивления усталости. Особенно эффективно упрочнение деталей с концентраторами напряжений. При исследованиях по оптимизации режимов поверхностного упрочнения следует иметь в виду, что суммарный эффект упрочнения зависит от взаимного расположения эпюр распределения по рабочему сечению детали рабочих и остаточных напряжений, а также механических свойств металла упрочненного слоя и сердцевины [1, 2]. При неблагоприятных режимах поверхностной обработки может получиться не повышение, а резкое снижение предела выносливости детали. Это имеет место в зоне повышенных напряжений, например, при обрыве упрочненного слоя при поверхностной закалке в зоне повышенных напряжений и концентрации напряжений (при обрыве закаленного слоя у корня зуба без закалки впадины зубчатого колеса). Неблагоприятное влияние на сопротивление усталости оказывают также режимы поверхностной обработки, при которых на поверхности детали образуются растягивающие остаточные напряжения. Растягивающие остаточные напряжения могут значительно снизить, а сжимающие – повысить сопротивление усталости деталей машин. В обоих случаях роль остаточных напряжений в усталостных процессах существенно меняется в зависимости от уровня внешних нагрузок, наличия концентраторов и степени концентрации.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [3] показано, что при определенных условиях усталостная трещина зарождается под поверхностно упрочненным

слоем в сердцевине детали, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными. При переменных во времени нагрузках в поверхностно упрочненных деталях имеют место случаи, когда разрушение происходит от поверхности или из сердцевины упрочненной детали переходит на поверхность. Следует иметь в виду, что в случае разрушения упрочненной детали от поверхности основную роль в повышении сопротивления усталости играют остаточные напряжения (характер распределения остаточных напряжений по толщине упрочненного слоя, их величина и знак в упрочненном слое и размеры поперечного сечения детали) и в меньшей степени механические характеристики упрочненного слоя. При зарождении усталостной трещины в сердцевине детали эффект упрочнения существенно зависит как от толщины упрочненного слоя, так и размеров поперечного сечения. При одной и той же толщине упрочненного слоя эффект упрочнения детали при циклическом изгибе будет тем больше, чем меньше размер ее поперечного сечения. Однако если детали упрочнить на одну и ту же относительную глубину, то приращение предела выносливости будет одинаковым. Повышение характеристик сопротивления усталости упрочненных деталей учитывается путем введения в расчетные зависимости коэффициента технологического упрочнения  $K_v = \sigma_{-1Двпр} / \sigma_{-1Д}$ , численные значения которого получены опытным путем ( $\sigma_{-1Двпр}$ ,  $\sigma_{-1Д}$  – пределы выносливости упрочненной и не упрочненной деталей соответственно). Следует отметить, что непосредственные испытания деталей, узлов и машин в целом на стендах,

полигонах или на основе опыта эксплуатации машин с деталями этого типа являются наиболее точным методом определения эффекта упрочнения. Однако этот метод является пассивным и дорогостоящим мероприятием, ибо он дает оценки эффекта на стадии эксплуатации машин при значительных наработках, на которой практически нельзя эффективно менять конструкцию и технологию поверхностного упрочнения деталей. Следует отметить, что отсутствие в настоящее время машин для усталостных испытаний является тормозом в разработке мероприятий по эффективному применению поверхностного упрочнения деталей машин. В связи с этим возникает необходимость в разработке методов расчета упрочнения ответственных деталей на стадии проектирования.

**Цель работы.** Разработать метод расчета эффекта упрочнения ответственных деталей на стадии проектирования. Решение этой задачи предлагается осуществлять графоаналитическим методом.

**Изложения основного материала.** Расчетное значение коэффициента технологического упрочнения  $K_v$  при зарождении усталостной трещины под упрочненным слоем рекомендуется рассчитывать по зависимости [3]

$$K_v = 1 / (1 - \Delta)^{3\alpha_\sigma}, \quad (1)$$

где  $\alpha_\sigma$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений;  $\Delta$  – относительная толщина упрочненного слоя. Для деталей круглой формы  $\Delta = 2\Delta_d / d$  (тут  $\Delta_d$  – толщина упрочненного поверхностного слоя, а  $d$  – диаметр упрочняемой детали).

При зарождении усталостной трещины у поверхности упрочненной детали коэффициент  $K_v$  определяется по результатам металлографических исследований твердости и остаточных напряжений в отдельных слоях поперечного сечения [3]

$$K_v = (H_{yn} / H_c) \cdot (\sigma_a / \sigma_{-1}) \quad (2)$$

где  $H_{yn}$ ,  $H_c$  – твердость соответственно упрочненных слоев и материала сердцевины упрочненной детали;  $\sigma_a / \sigma_{-1}$  выбирается по диаграмме относительных напряжений при асимметричных циклах (рис.1 [1]) для соответствующих значений остаточных напряжений  $\sigma_{ост} = \sigma_m$ .

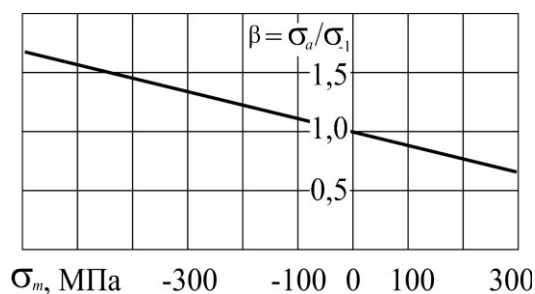


Рисунок 1 – Диаграмма относительных предельных напряжений при асимметричных циклах для конструкционных сталей

При проведении проекторочных инженерных расчетов большое значение имеет сокращение времени для решения задачи оптимизации конструкции (выбор конструкционного материала, размеров поперечного сечения, конфигурации детали в опасном сечении) и технологических процессов (выбор метода и режимов поверхностного упрочнения применительно к конкретным задачам проектирования). Эта процедура существенно упрощается путем использования номограммы. На рис. 2 в качестве примера приведена номограмма для оценки эффективности упрочнения зубьев колес. По зависимости (1) были определены значения коэффициента  $K_v$  для зубчатых колес с различными числами зубьев  $z$  и коэффициентами смещения  $x$ . При этом теоретические коэффициенты концентрации напряжений рассчитывались по формуле [4]

$$\alpha_\sigma = 2 - (8/z) \left[ (1 - 2x/1 + x^2) \right]. \quad (3)$$

В расчетах величины  $\Delta$  варьировались от нуля до 0,2 и коэффициенты смещения  $x$  от  $-0,5$  до  $+0,8$  с шагом 0,1 для зубчатых колес с числами зубьев  $z = 17$  и 85 (для колеса с  $z = 17$   $0 \leq x \leq 0,8$ ). При этом коэффициент  $\alpha_\sigma$  находился в пределах 1,53-1,99. Кривые 1-6 соответствуют значениям  $x$  равным 0; 0,1; 0,4; 0,6 и 0,8 для колеса с числом зубьев  $z = 17$ , а кривые 1'-3' – значениям  $x$ , равным  $-0,5$ ; 0; 0,8 для колеса с  $z = 85$ .

Анализ рис. 2 показывает, что относительная толщина упрочненного слоя  $\Delta$  (в большей мере) и коэффициент смещения  $x$  существенно влияют на коэффициент упрочнения  $K_v$ , который для рассматриваемых передач может изменяться от единицы до двух и более, причем эффект упрочнения больше у колес с большим числом зубьев.

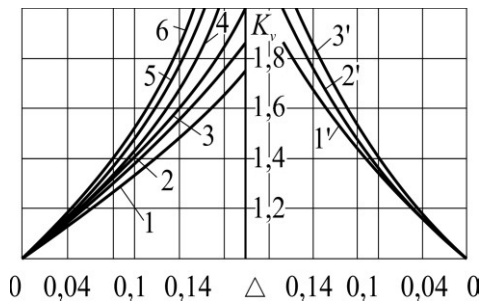


Рисунок 2 – Влияние толщины поверхностно упрочненных слоев Δ и коэффициента смещения на коэффициент  $K_v$

На основании рис. 2 можно сделать вывод, что рекомендуемые в справочной литературе величины коэффициента  $K_v = 1,1-1,3$  являются заниженными. Это подтверждается также результатами усталостных испытаний на изгиб цилиндрических образцов с концентраторами напряжений и без них из материалов, используемых для изготовления зубчатых колес с различными видами упрочнений и без них, согласно которым  $1 \leq K_v \leq 2,68$  [5]. Номограмма позволяет оценить эффект упрочнения детали через коэффициент технологического упрочнения. На рис. 3 приведена универсальная номограмма для решения подобного рода практических задач. При построении верхней части номограммы задавались значениями параметров  $\alpha_\sigma$ ,  $\Delta$  и по формуле (1) определяли соответствующий им коэффициент упрочнения  $K_v$ . Значения теоретического коэффициента концентрации напряжений изменяли от  $\alpha_\sigma = 1$  (гладкая деталь) до  $\alpha_\sigma = 2,2$  (шаг изменения 0,2), относительная толщина упрочненного слоя  $\Delta$  варьировалась от нуля до 0,175 с шагом 0,025. Для построения нижней части номограммы задавались значениями пределов выносливости не упрочненных деталей  $\sigma_{-1д}$  и коэффициента упрочнения  $K_v$ . Получено более 500 значений параметра наклона левой ветви кривой усталости  $m_F$ .

Значение параметра  $m_F$  вычисляли по формуле [3]

$$m_F = (1 + 2,3 \lg K_v^2)(0,027\sigma_{-1д} + 1,4), \quad (4)$$

где  $\sigma_{-1д}$  – предел выносливости не упрочненной детали. Из рис. 3 видна высокая плотность расположения значений  $m_F$  на координатной

сетке.

$$\delta_{m_F} = \left[ (m_F^p - m_F) / m_F^p \right] \cdot 100 \%$$

Отклонения расчетных значений параметра  $m_F^p$  от значений  $m_F$ , выбранных по кривой, незначительны (отклоняются в ту и другую сторону не более чем на 8 %), причем положительные значения чередуются с отрицательными, что указывает на малость систематической ошибки определения параметра  $m_F$  по рис. 3.

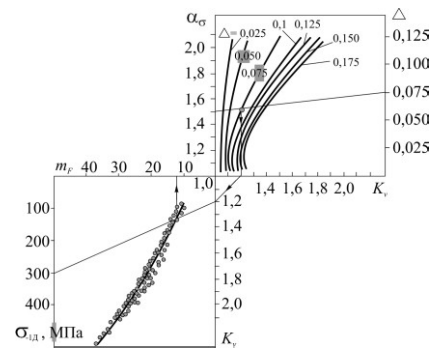


Рисунок 3 – Номограмма определения коэффициента  $K_v$  и параметра  $m_F$

Рассмотрим область применения номограммы. По имеющимся сведениям о теоретическом коэффициенте концентрации напряжений и рекомендациям по выбору глубины упрочнения, соответствующей конкретным требованиям, можно оценить, не прибегая к эксперименту, повышение предела выносливости поверхностно упрочненной детали через коэффициент  $K_v$ . Для чего исходные значения параметров  $\alpha_\sigma$  и  $\Delta$  наносим на соответствующие шкалы рис. 3 и проводим через отмеченные точки прямую линию. Точка пересечения линий определяет значение коэффициента технологического упрочнения  $K_v$  для выбранного значения относительной толщины поверхностно упрочненного слоя  $\Delta$ . Располагая сведениями о значении коэффициента  $K_v$  и предела выносливости не упрочненной детали  $\sigma_{-1д}$ , можно определить величину параметра  $m_F$ . Пример последовательности определения  $K_v$  и  $m_F$  показан на рис. 3.

Наличие предложенных номограмм позволяет дифференцированно учитывать особенности рассчитываемой детали по величине теоретического коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$  и относительной

толщине упрочненного слоя  $\Delta$ . Анализ номограмм показывает, что при увеличении толщины упрочняемых слоев, не превышающей значений, при которых деталь разрушается от поверхности, повышается эффект упрочнения. Эта тенденция сохраняется при увеличении теоретического коэффициента концентрации напряжений. Такой подход является более строгим, чем с помощью осредненных значений коэффициента  $K_v$ , полученных в результате малочисленных экспериментальных испытаний образцов или использования сведений об испытаниях прототипа. В последнем случае значения коэффициента  $K_v$  имеют большой разброс.

#### Выводы

Предложенный графоаналитический метод определения эффекта упрочнения позволяет на стадии проектирования и доводки опытного экземпляра машины выбрать необходимое значение коэффициента технологического упрочнения  $K_v$  для различных конструктивно-технологических вариантов, найти оптимальные варианты и оценить прочность упрочненных деталей на данной стадии.

#### Список использованных источников

1. Когаев В. П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность: Справ. /В. П. Когаев,

В. С. Кравчук, к.т.н., О. Ф. Дашченко, д.т.н., О. М. Лимаренко, к.т.н.

### ГРАФОАНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТУ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВО-ЗМІЦНЕНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Розглянуто особливості впливу залишкових напружень і механічних властивостей металу зміцненого шару на втомлену міцність гладеньких деталей та деталей із концентраторами напружень. Показана необхідність диференційного врахування залишкових напружень і механічних властивостей металу зміцненого шару для забезпечення потрібного ефекту зміцнення. Запропоновано графоаналітичний метод визначення ефекту зміцнення, який дає змогу на стадії проектування та доведення дослідного екземпляра машини обґрунтовано вибрати потрібне значення коефіцієнта технологічного зміцнення.*

**Ключові слова:** поверхнєве зміцнення, ефект зміцнення, графоаналітичний метод.

V. S. Kravchuk, PhD, A. F. Dashchenko, DSc, A. M. Limarenko, PhD

### COMPUTER MODELING AND NUMERICAL ANALYSIS TELESCOPIC BOOM TRUCK CRANE

*The features of the influence of residual stresses and mechanical properties of the hardened layer of metal on the tired strength of smooth parts and the details of the stress concentrators are considered. The necessity of a differentiated account of residual stresses and mechanical properties of reinforced metal layer to provide the desired strengthening effect is shown. Graphic analytical method for determining the effect of strengthening, which allows the design stage and finishing of the prototype machine reasonably select the desired strengthening of the technological factor is proposed.*

**Keywords:** surface hardening, strengthening effect, semigraphical method.

Н. П. Махутов, А. П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.

2. Влияние размеров поперечного сечения поверхностно-упрочненных образцов из сплава Д16Т на сопротивление усталости в условиях концентрации /В. Ф. Павлов, В. И. Лапин, Ю. И. Кольцун и др. – Пробл. прочности. – 1990. – № 4. – С. 75 - 78.

3. Дашченко А. Ф. Несущая способность упрочненных деталей машин /А. Ф. Дашченко, В. С. Кравчук, В. Д. Иоргачев. – Одесса: Астропринт, 2004. – 160 с.

4. Устиненко В. Л. Напряженное состояние и прочность зубчатых колес: Ч.1. Напряженное состояние зубьев цилиндрических прямозубых колес /В. Л. Устиненко. – Харьков: Харьк. высш. командно-инж. уч-ще, 1976. – 100 с.

5. Морозов В. И. Наклеп дробью тяжело нагруженных зубчатых колес /В. И. Морозов, Н. Б. Шубина. – М.: Машиностроение, 1972. – 104 с.

*Поступила в редакцию 13.05.2016*

**Рецензент:** д.т.н., профессор Боряк К.Ф., Одесская государственная академия технического регулирования и качества, г. Одесса.