

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ С УЧЕТОМ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Рассматривается возможность определения предела выносливости расчетным путем для деталей из металлических материалов. Учитывается распределение по глубине поверхности параметров поверхностного слоя после технологической обработки: твердости, технологических остаточных напряжений, шероховатости поверхности.

Предел выносливости определяет сопротивление материала разрушению при циклических нагрузках, поэтому наиболее физически обоснованно искать корреляционную связь предела выносливости с истинными характеристиками разрушения материала.

Предложенный в данной работе метод определения предела выносливости основывается на двух установленных закономерностях.

Во-первых, была обнаружена и обоснована тесная корреляционная связь предела выносливости σ_{-1} с истинным сопротивлением сдвигу, имеющим физический смысл напряжения течения в центре шейки растянутого образца в момент разрыва S_{0*} [1]

$$\sigma_{-1} = S_{0*} / M_R, \quad (1)$$

где M_R – коэффициент эквивалентности нестационарных напряженных состояний. Величина S_{0*} может быть найдена через характеристики, измеряемые при статических испытаниях.

Во-вторых, в работе [2] установлена линейная регрессионная зависимость S_{0*} от твердости по Виккерсу HV вида:

$$S_{0*} = A \cdot HV + B, \quad (2)$$

где A, B – параметры регрессионного уравнения.

Были исследованы данные по 268 наименованиям сталей и других конструкционных материалов в различных структурных состояниях. Истинное сопротивление сдвигу определялось через параметры статической прочности σ_B, ψ, S_K по формулам П. Бриджмена и М. П. Марковца. Установлены следующие обобщенные зависимости (S_{0*}, HV в МПа):

$$S_{0*} = 0,46 \cdot HV + 65 - \quad (3)$$

для твердости по Виккерсу;

$$S_{0*} = 0,51 \cdot HB + 70 - \quad (4)$$

для твердости по Бринеллю.

При этом коэффициент корреляции $r = 0,957$, что свидетельствует о тесной корреляционной связи S_{0*} и HV .

Используя регрессионные зависимости (3), (4), по формуле (1) можно определить обобщенную зависимость предела выносливости от твердости для конструкционных материалов. Показано [3], что расчетные значения σ_{-1} имеют относительную погрешность, не превышающую 15% от экспериментальных значений σ_{-1} .

Для уточнения параметров регрессионных уравнений (3), (4) и коэффициента M_R с целью повышения точности метода определения предела выносливости по твердости были проведены специальные исследования применительно к сталям 30ХГСА, У8, титановому сплаву ВТ3-1, алюминиевому сплаву Д16 в различных структурных состояниях, достигаемых термообработкой. Изготавливались образцы для испытаний на статический разрыв. Замерялась твердость образцов в исходном состоянии (до испытаний), производились испытания на статический разрыв, в результате которых определялось истинное сопротивление сдвигу. Из этих же партий материалов изготавливались образцы для испытаний на усталость, в результате таких испытаний были определены пределы выносливости. Поверхности всех образцов для обоих видов испытаний были обработаны электрополированием (для исключения влияния ее на механические свойства).

В табл. 1 приводятся параметры регрессионных уравнений $S_{0*} = A \cdot HV + B$ и соответствующие коэффициенты корреляции, коэффициенты эквивалентности нестационарных напряженных состояний для исследованных сталей и сплавов. Расчетные (по твердости) и экспериментальные значения пределов выносливости и относительная погрешность расчетных значений приводятся в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что точность определения предела выносливости по твердости (если принять, что они однородны по всему сечению образцов) достаточно высока.

Для прогнозирования характеристик усталостной прочности реальных деталей важно учитывать влияние модифицированных (подвергнутых воздействию технологических методов поверхностной обработки) поверхностных слоев, поскольку их влияние на усталостную долговечность может быть во многом объяснено условиями развития макротрещин усталости. Рассмотрим влияние на предел выносливости основных параметров качества поверхностного слоя: остаточных напряжений, деформационного упрочнения и шероховатости поверхности.

Таблица 1. Параметры регрессионного уравнения

$$S_{0*} = A \cdot HV + B \quad (S_{0*}, HV - \text{в МПа})$$

и коэффициент эквивалентности нестационарных напряженных состояний M_R .

| Материал | Параметры регрессионного уравнения $S_{0*} = A \cdot HV + B$ | | Коэффициент корреляции r | Коэффициент эквивалентности нестационарных напряженных состояний M_R | |
|-----------------------|--|-------|----------------------------|--|-----------------|
| | A | B | | изгиб | растяж. – сжат. |
| Сталь 30ХГСНА | 0,328 | 406 | 0,998 | 3,38 | 4,26 |
| Сталь У8 | 0,280 | 335,9 | 0,976 | 3,38 | 4,26 |
| Титановый сплав ВТЗ-1 | 0,251 | 696,7 | 0,868 | 3,51 | 4,30 |
| Алюмин. сплав Д16 | 0,412 | 137,1 | 0,954 | 3,65 | 4,33 |

Таблица 2. Сравнение расчетных и экспериментальных значений пределов выносливости.

| Материал | Термо-обработка | Твердость HV, МПа | Предел выносливости σ_{-1} при чистом изгибе, МПа | | Относит. погрешн., % |
|---|----------------------------|-------------------|--|----------|----------------------|
| | | | эксперим. | расчетн. | |
| Сталь 30ХГСНА | Отжиг 900 °С | 2167 | 342 | 330 | -3,5 |
| | Зак. с 900 °С +отп. 520 °С | 3826 | 481 | 491 | +2,1 |
| | Зак. с 900 °С +отп. 290 °С | 5338 | 612 | 638 | +4,2 |
| Сталь У8 | Отжиг 750 °С | 2090 | 252,5 | 254 | +0,6 |
| | Зак. с 800 °С +отп. 600 °С | 2720 | 333 | 325 | -2,3 |
| | Зак. с 800 °С +отп. 450 °С | 4083 | 452 | 438 | -3,1 |
| Титановый сплав ВТЗ-1 | Термомагн. обработка | 4196 | 473 | 499 | +5,4 |
| | Закалка + старение | 4240 | 546 | 502 | -8,1 |
| | Отжиг | 3452 | 465 | 445 | -4,3 |
| Алюмин. сплав Д16, различных партий (П) | П 1 | 1358 | 187 | 191 | +2,0 |
| | П 2 | 1287 | 180 | 183 | +1,7 |
| | П 3 | 1324 | 181 | 187 | +3,3 |
| | П 4 | 1412 | 191 | 197 | +3,0 |
| | П 5 | 1369 | 191 | 192 | +0,5 |
| | П 6 | 1306 | 188 | 185 | -1,5 |

Условно разобьем весь поверхностный слой по глубине на ряд подслоев, в которых можно принять неизменными параметры качества. В каждом таком подслое действуют остаточные напряжения, которые создают асимметричный цикл в этом подслое со средним напряжением цикла σ_m , численно равным остаточным напряжениям (точ-

нее, интенсивности остаточных напряжений) σ_{ri} , то есть происходит суперпозиция рабочих и остаточных напряжений. Осевые σ_{rl} и тангенциальные $\sigma_{r\tau}$ остаточные напряжения имеют взаимно перпендикулярное направление, поэтому их интенсивность равна:

$$\sigma_{ri} = \text{sign}(\sigma_{rl}) \sqrt{\sigma_{rl}^2 + \sigma_{r\tau}^2} - \sigma_{rl} \sigma_{r\tau}$$

Для определения предела выносливости при наличии остаточных напряжений можно воспользоваться зависимостью для определения предела выносливости при асимметричном цикле σ_R [3]:

$$\sigma_R = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{0*}} \right) \quad (5)$$

Влияние деформационного упрочнения (наклепа) поверхностного слоя учитывается в зависимостях для определения S_{0*} по твердости (2), (3), (4) и табл. 1.

Шероховатость поверхности учитывается только в подслое, прилегающем к поверхности, коэффициентом K_u , имеющим физический смысл коэффициента концентрации напряжений от микрогеометрии поверхности [4, 5]. Концентрация напряжений и масштабный фактор учитываются соответствующими коэффициентами $K_{\sigma K}$ и $K_{D\sigma}$ [5].

После преобразований, на основе формул (1), (2), (5), получена зависимость для определения предела выносливости с учетом параметров качества поверхностного слоя:

$$\sigma_R = \frac{1}{M_R} \left(\frac{K_{D\sigma} (A \cdot HV + B)}{K_{\sigma K} K_u} - \sigma_m - \sigma_{ri} \right) \quad (6)$$

Используя зависимость (6), можно вычислять значения пределов выносливости в каждом подслое и построить эпюру распределения σ_{-1} по глубине поверхностного слоя. Зарождение усталостной трещины наступит тогда, когда эпюра рабочих напряжений коснется эпюры распределения σ_{-1} , при этом точка пересечения этой эпюры с осью напряжений укажет численное значение предела выносливости всей детали.

На рисунке 1 изображены распределения микротвердости (которая является по существу твердостью по Виккерсу HV), осевых технологических остаточных напряжений σ_{rl} и рассчитанное по формуле (6) распределение предела выносливости при симметричном цикле σ_{-1} для стали 30ХГСНА после операции алмазного выглаживания (P = 150 Н, S = 0,05 мм/об). Коэффициент K_u принят равным 0,988 [4]. Проведена прямая – эпюра рабочих напряжений при симметричном изги-

бе, касающаяся распределения σ_{-1} в точке, расположенной у поверхности и соответствующей $\sigma_{-1} = 714$ МПа.

По результатам испытаний на усталость соответствующих образцов определен предел выносливости, равный $\sigma_{-1} = 720$ МПа, что близко к расчетному значению.

Таким образом, возможно определение пределов выносливости деталей без концентраторов напряжений с учетом качества их поверхностного слоя; возможен анализ конструктивно-технологических факторов, влияющих на предел выносливости без проведения дорогостоящих усталостных испытаний.

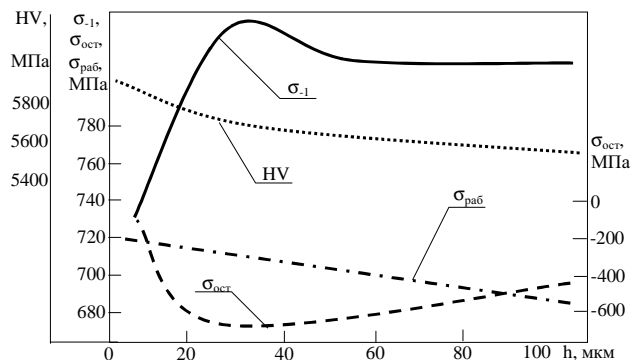


Рисунок 1. Распределение микротвердости HV, осевых технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, предела выносливости σ_{-1} , рабочих напряжений $\sigma_{раб}$ по глубине поверхностного слоя h для стали 30ХГСНА после алмазного выглаживания ($P= 150$ Н, $S= 0, 05$ мм/об); нагружение циклический симметричный изгиб с вращением.

Список использованной литературы:

1. Федоров В. В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. – Ташкент: Фан, 1985. -168 с.
2. Ромашов Р. В., Федоров В. В., Соболев В. Л. О корреляционной связи пределов выносливости металлов с характеристиками статической прочности / Проблемы прочности, 1980, с. 24-27.
3. Щипачев А. М. Термодинамическая теория прочности: прогнозирование многоциклового усталости металлов. Уфа: УТИС, 1998. – 107 с.
4. Сулима А. М., Евстигнеев М. И. Качество поверхностного слоя и усталостная долговечность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1974. – 255 с.
5. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.