

МЕХАНИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ НА СТАДИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО УСТАЛОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ

В.Ю. Блюменштейн, д-р техн. наук, проф.
Кузбасский государственный технический университет
(г. Кемерово, Россия)

В современных условиях актуальным является создание и использование автоматизированных методик проектирования технологий упрочняющей обработки, обеспечивающих требуемые параметры качества поверхностного слоя и, соответственно, долговечности в условиях приложения усталостных нагрузок. Повышение эффективности таких методик требует учета технологического наследования свойств металла поверхностного слоя детали на всех стадиях жизненного цикла. При этом важным является использование единых представлений о накоплении и трансформации свойств поверхностного слоя, как на стадиях механической обработки, так и на стадиях эксплуатации.

Механика технологического наследования (ТН) базируется на представлениях о непрерывном накоплении деформаций и исчерпании запаса пластичности металлом поверхностного слоя на стадиях механической обработки и последующего эксплуатационного усталостного нагружения. Усталостное нагружение представляется в виде двух стадий, первая из которых начинается с приложения циклических нагрузок и заканчивается моментом полного исчерпания запаса пластичности и появлением видимых дефектов (стадия циклической долговечности – ЦД). Вторая стадия усталостного нагружения начинается с момента нарушения сплошности материалом поверхностного слоя, заканчивается полным разрушением (разделением на части) детали и описывается диаграммой циклической трещиностойкости (стадия циклической трещиностойкости – ЦТ).

По окончании механической обработки в поверхностном слое имеет место остаточное напряженно–деформированное состояние (НДС), характеризуемое распределением степени деформации сдвига $\Lambda_{\text{мех}}$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Psi_{\text{мех}}$ на глубину $h_{\text{мех}}$, а также тензором остаточных напряжений $\llbracket \sigma_{\text{ост}} \rrbracket$, уравновешенных в пределах детали. При циклическом нагружении тензор действующих (суммарных) напряжений представлен в виде суммы тензоров остаточных и усталостных (циклических) напряжений: $\llbracket \sigma_{\text{д}} \rrbracket = \llbracket \sigma_{\text{ост}} \rrbracket + \llbracket \sigma_{\text{цм}} \rrbracket$. Усталостное нагружение означает продолжающееся накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности металлом поверхностного слоя, циклическое изменение схемы напряженного состояния в каждой точке поперечного сечения детали вследствие релаксации остаточных напряжений. При этом в каждом цикле усталостного нагружения установлены квазимонотонные участки, на границах которых происходит смена знака деформаций и, соответственно, частичное залечивание накапливаемых дефектов.

Экспериментальные исследования проводились на образцах из стали 45 (HV 160–180) с диаметром рабочей части 20 мм. Образцы обрабатывались резанием и ППД по различным программам, после чего подвергались усталостным испытаниям в условиях циклического изгиба с вращением. Расчеты параметров качества поверхностного слоя проводились с учетом наследуемых свойств по специальной методике, основанной на МКЭ–моделировании, методе визиопластичности и расчетах деформационных параметров.

Различная история нагружения приводит к различным конфигурациям программ нагружения; чем больше наследуемая на стадиях механической обработки степень деформации сдвига $\Lambda_{\text{мех}}$, тем меньшей пластичностью обладает поверхностный слой на стадии ЦД. В свою очередь, увеличение наследуемой $\Lambda_{\text{мех}}$ приводит к тому, что максимальные значения приростов степени деформации сдвига в циклах усталостного нагружения $\Delta\Lambda_{\text{уст}}$ уменьшаются; к концу стадии ЦД значения $\Delta\Lambda_{\text{уст}}$ становятся минимальными.

Установлено, что технологическая наследственность влияет на продолжительность стадии ЦД. Уровень наследуемой степени деформации сдвига $\Lambda_{\text{мех}} = 0,75$ является критическим; увеличение степени деформации сдвига выше этого значения приводит к снижению продолжительности стадии ЦД.

Численное моделирование, а также фрактографические исследования показали, что в поверхностном слое имеется некая материальная частица, расположенная в определенном сечении и на определенной глубине от поверхности детали, где происходит наиболее интенсивное накопление деформаций. Выявлено, что увеличение наследуемой степени деформации сдвига $\Lambda_{\text{мех}}$ приводит к интенсивному увеличению глубины расположения точки вероятного разрушения; этот рост замедляется при $\Lambda_{\text{мех}} \geq 0,75$.

Окончанию стадии ЦД соответствует полная релаксация остаточных напряжений ($\sigma_{\text{ост}} = 0$), накопление предельной степени деформации сдвига Λ_p , полное исчерпание запаса пластичности металлом поверхностного слоя в этой точке ($\Psi = 1$) и появление первой несплошности металла в виде начальной трещины.

Появление в поверхностном слое дефектов металла в виде нарушения сплошности означает начало новой стадии – стадии циклической трещиностойкости.

Методика обработки экспериментальных результатов на стадии циклической трещиностойкости предполагала определение зависимостей: прогибов образца от числа циклов $f = f(N)$; глубины трещины от прогибов образца $b_{\text{тр}} = b_{\text{тр}}(f)$; глубины трещины от числа циклов $b_{\text{тр}} = b_{\text{тр}}(N)$; скорости роста трещин от числа циклов $V = V(N)$; коэффициентов интенсивности напряжений от действующих напряжений и глубины трещины $K = K(\sigma, b_{\text{тр}})$; скорости роста трещин от коэффициента интенсивности напряжений и построение диаграммы циклической трещиностойкости $V = V(K)$.

Установлено, что на стадии ЦТ продолжается накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности в металле развивающейся трещины как по направлению к поверхности, так и в глубину поверхностного слоя детали. На больших расстояниях от устья трещины напряженное состояние описывается коэффициентом интенсивности напряжений, а тензор напряженного состояния также трансформируется в каждом цикле. Поверхностный слой металла по своим свойствам в этот момент времени является еще более неравномерным; границей этой неравномерности является несплошность в виде развивающейся усталостной трещины.

Можно говорить о том, что очаг пластической деформации в устье трещины работает в условиях стадии циклической трещиностойкости, а остальные слои металла накапливают деформацию в соответствии с закономерностями стадии циклической долговечности. Накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности является непрерывным, приводя к нарушению сплошности в новых слоях металла и росту первоначальных размеров трещины. По мере увеличения размеров дефекта происходит «ужесточение» напряженного состояния и увеличение скорости исчерпания запаса пластичности. В конечном итоге, это приводит к увеличению скорости роста трещины и разрушению детали по всему сечению (разделению на части).

С увеличением наследуемой степени деформации сдвига до уровня примерно $\Lambda_{\text{мех}} \approx 0,75$ происходит увеличение как общей долговечности до разрушения N_p , так и составляющих ее величин $N_{\text{ЦТ}}$ и $N_{\text{ЦТ}}$. Дальнейшее увеличение наследуемой деформации приводит к уменьшению N_p , $N_{\text{ЦТ}}$ и увеличению продолжительности стадии циклической трещиностойкости $N_{\text{ЦТ}}$ (рисунок 1). Это обусловлено большим сопротивлением упрочненного поверхностного слоя дальнейшему развитию трещины.

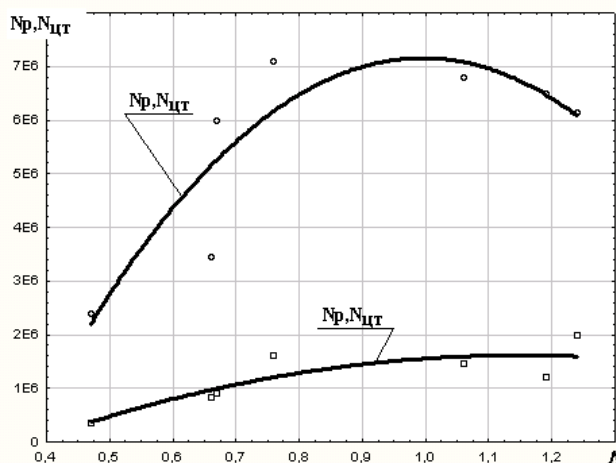


Рисунок 1 – Зависимость общей долговечности и циклической трещиностойкости от наследуемой степени деформации сдвига

Установлены закономерности ТН, технологии и режимы механического упрочнения методом ППД, приводящие к существенному снижению скорости роста трещин.