

*А.Ю. Морозов, В.Ф. Павлов, Е.А. Денискина,
О.Ю. Семёнова, С.А. Михалкина*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АГРЕГИРОВАННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Введение. Современное проектирование ответственных элементов летательных аппаратов требует высокой точности в оценке их прочности и долговечности. Одним из ключевых факторов, определяющих эксплуатационные характеристики деталей, подвергаемых интенсивным циклическим нагрузкам, являются остаточные напряжения, возникающие в поверхностных слоях в результате технологических воздействий. Поверхностное упрочнение – широко применяемый метод повышения ресурса конструкций – формирует специфическое распределение остаточных напряжений, способствующее сопротивлению усталости и зарождению трещин.

Несмотря на обширный опыт в исследовании остаточных напряжений, до сих пор не сформирован универсальный подход, позволяющий эффективно учитывать вариативность технологических параметров при моделировании. Проблема осложняется необходимостью интеграции разнородных данных, полученных как теоретическим путём, так и в ходе экспериментальных исследований.

В этой работе предложена методика представления данных в виде агрегированных математических зависимостей, объединяющих ключевые параметры процесса упрочнения и характеристик материала. Такой подход позволяет выстраивать обобщённые модели остаточных напряжений, пригодные для включения в инженерные расчёты и системную оптимизацию производственных процессов в авиационно-космической отрасли.

Теоретические основы формирования остаточных напряжений. Процессы образования остаточных напряжений в конструкционных материалах при поверхностной обработке объясняются совокупностью механических и термомеханических воздействий, приводящих к локализованной пластической деформации. Возникающие при этом внутренние напряжённые состояния существенно влияют на работоспособность изделий, особенно в условиях переменных нагрузок.

С позиции механики сплошной среды, распределение остаточных напряжений описывается уравнениями равновесия и совместимости, при этом основное внимание уделяется моделированию напряжений по глубине слоя упрочнения. Расчёты показывают, что наибольшие значения сжимающих напряжений сосредоточены в приповерхностной зоне, с последующим спадом вглубь материала. Геометрия и характер этих распределений определяются типом упрочнения, интенсивностью воздействия, а также свойствами обрабатываемого материала [1].

Современные подходы к описанию остаточных напряжений предполагают использование аппроксимирующих функций, отражающих нелинейный характер упрочнения. Наряду с аналитическими выражениями, строятся модели, учитывающие влияние технологических параметров на глубину упрочнённого слоя и величину остаточных напряжений [2, 3].

В практических целях особую значимость приобретают агрегированные модели, объединяющие входные параметры процессов (например, давление струи, расход абразива, длительность воздействия) в обобщённые математические зависимости. Такие агрегаты служат основой для последующего анализа выносливости и оптимизации режимов обработки [4]. Отдельное внимание уделяется сопоставлению расчётных данных с результатами натурных измерений, что позволяет уточнить параметры моделей и повысить точность прогнозирования [5].

Агрегированные модели для описания упрочнённых слоёв. Формирование агрегированных моделей для расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях требует выбора и согласования ключевых параметров технологического процесса. Основными переменными, оказывающими влияние на характеристики остаточных напряжений, являются давление рабочей среды, расход абразивного материала, длительность воздействия и параметры деформируемого материала [1, 3].

Агрегирование этих параметров позволяет построить универсальные зависимости, связывающие технологические режимы с глубиной упрочнённого слоя и распределением остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя деталей. Такие зависимости, как правило, принимают форму обобщённых степенных или экспоненциальных функций, в которых экспериментально определяемые коэффициенты отражают специфику конкретной обработки [1, 4]. Например, глубина упрочнённого слоя d может быть выражена в виде функции:

$$d = k_1 \cdot P^{0,5} \cdot Q^{0,3} \cdot t^{0,2}, \quad (1)$$

где P – давление струи, Q – расход абразива, t – время обработки, а k_1 – эмпирический коэффициент, определяемый по эксперименту [3].

При создании агрегатов важно обеспечить воспроизводимость и универсальность получаемых зависимостей. Для этого необходима калибровка моделей на базе экспериментальных данных, полученных с использованием современных методов неразрушающего контроля, таких как рентгеноструктурный анализ и измерения методом снятия слоёв [2, 5].

Дополнительной задачей является корректная интерпретация аппроксимирующих функций, связывающих параметры технологического процесса с результирующими напряжениями. В этом контексте агрегаты выступают в качестве промежуточного уровня между физическими моделями и прикладными расчётами прочности, что позволяет использовать их как основу для оптимизации режимов упрочнения [1, 4].

Пример применения метода: ультразвуковая обработка стали 12ХНЗА. Для демонстрации практической применимости разработанных агрегированных моделей рассмотрим процесс ультразвуковой поверхностной обработки (УЗПО) стали 12ХНЗА [1]. Данный вид обработки используется для повышения сопротивления усталости ответственных деталей, работающих в условиях переменных нагрузок и концентрации напряжений.

Согласно экспериментальным данным, УЗПО формирует выраженные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое глубиной до 0,4 мм [1, 2]. Основными параметрами, влияющими на характеристики упрочнённого слоя, являются амплитуда ультразвуковых колебаний, сила прижатия инструмента, частота и длительность обработки. Эти параметры были агрегированы в виде обобщённой функции:

$$\sigma_{res}(x) = f(A, F, t, x), \quad (2)$$

где x – глубина измерения, A – амплитуда колебаний, F – сила прижатия, t – время обработки.

Следует отметить, что эмпирические зависимости позволяют выразить глубину упрочнённого слоя d по формуле (3) [1]:

$$d = k_3 \cdot A^{0,6} \cdot F^{0,4} \cdot t^{0,2}, \quad (3)$$

где k_3 – эмпирический коэффициент, получаемый методом аппроксимации экспериментальных данных.

Для калибровки модели были использованы данные измерений остаточных напряжений методом снятия слоёв. Результаты подтвердили, что расчётные значения глубины упрочнения и пикового остаточного напряжения находятся в пределах 10% от экспериментальных [2, 4]. Таким образом, агрегированная модель позволяет с приемлемой для практики точностью прогнозировать характеристики упрочнённого слоя, опираясь на контролируемые технологические параметры. Распределение остаточных напряжений, полученное с помощью разработанной модели, представлено на рис. 1.

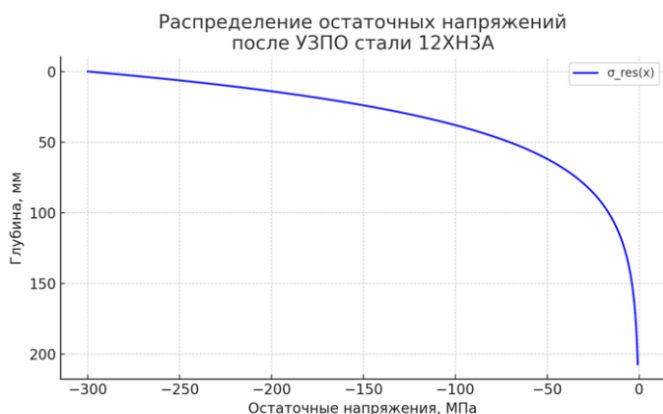


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений в стали 12ХН3А после УЗПО

Кроме того, была предпринята попытка использования агрегированной модели в задачах оценки усталостной прочности. Полученные данные о распределении остаточных напряжений использовались для расчёта коэффициентов концентрации напряжений и прогнозирования предела выносливости деталей с концентратором [3].

Таким образом, рассмотренный пример подтверждает целесообразность и эффективность использования агрегированных моделей при анализе процессов поверхностного упрочнения, в том числе с возможностью дальнейшего применения в расчётах на прочность и долговечность [1, 3].

Перспективы применения агрегированных моделей. Предложенный в работе подход к агрегированию технологических параметров в

виде универсальных математических зависимостей демонстрирует высокую применимость в задачах инженерного анализа прочности. Унификация эмпирических зависимостей, связывающих режимы поверхностного упрочнения с формированием остаточных напряжений, позволяет перейти от разрозненных экспериментальных данных к систематизированным расчётным моделям. Это особенно актуально для авиационно-космической отрасли, где высокая вариативность технологий сочетается с жёсткими требованиями к ресурсу и надёжности конструкций.

Агрегированные модели можно использовать в составе автоматизированных программных комплексов расчёта напряжённо-деформированного состояния и прогнозирования усталостной прочности. Их преимуществом является относительная простота, сочетающаяся с достаточной точностью при аппроксимации экспериментальных данных, что подтверждается результатами моделирования процессов УЗПО и гидродробеструйной обработки [1, 3, 4].

Особенно перспективным направлением является интеграция агрегированных моделей в системы цифровых двойников, что позволяет в реальном времени оценивать остаточные напряжения по параметрам процесса. Такая интеграция даст возможность на этапе проектирования учитывать влияние технологических операций на остаточные напряжения и, соответственно, на ресурс изделия. Это особенно важно при комбинированных упрочняющих технологиях, где взаимодействие эффектов от различных воздействий требует обобщённого подхода к моделированию [1, 4].

Кроме того, агрегированные зависимости могут служить базой для оптимизации технологических режимов: изменяя амплитуду, давление, расход и длительность обработки, можно прогнозировать не только глубину упрочнённого слоя, но и остаточное напряжённое состояние, влияющее на выносливость. Это создаёт основу для рационального управления технологией на основе целевых функциональных характеристик.

Заключение. Таким образом, предложенный метод агрегирования является эффективным инструментом для перехода от экспериментальных данных к прикладным инженерным моделям, обеспечивая надёжную и адаптивную основу для проектирования, анализа и оптимизации поверхностного упрочнения авиационно-космических компонентов.

Список использованных источников

1. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Самарский университет, 2012.
2. Захарова Н.В., Ларин А.П. Методы измерения и моделирования остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 41, № 6. – С. 508–516.
3. Иванов А.А., Петров В.П. Влияние гидродробеструйной обработки на остаточные напряжения и усталостную прочность стали 45 // Журнал материаловедения и обработки. – 2021. – Т. 12. – № 3. – С. 45-53.
4. Новиков П.А., Романова Е.М. Моделирование пластической деформации и распределения остаточных напряжений при гидродробеструйной обработке стали 45 // Компьютерные технологии в машиностроении. – 2021. – Т. 17. – № 2. – С. 58-65.
5. Withers P.J., Bhadeshia H.K.D.H. Residual stress Part 1 – Measurement techniques // Materials Science and Technology. – 2001. – Vol. 17, №4. – P. 355-365.

УДК 621.787:539.319

***В.Ф. Павлов, В.С. Вакулюк, Ю.Н. Петрова, Ю.А. Катанаева,
И.Ю. Коваль***

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Основную роль в повышении сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений после поверхностного пластического деформирования (ППД) играют сжимающие остаточные напряжения [1]. Для оценки влияния ППД на предел выносливости деталей используются два критерия. Первым критерием, использованным в работах [1-3], являются остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали. Формула для оценки предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла σ_{-1} упрочнённой детали в этом случае имеет следующий вид:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^0 - \psi_{\sigma} \left| \sigma_z^{нов} \right|, \quad (1)$$