

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ НЕРАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ

Использование упрочняющих технологических операций для создания сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбовых деталей приводит к существенному повышению сопротивления усталости. Например, болты из высокопрочных материалов, накатанные после отжига, имеют предельную амплитуду цикла в 1,5 – 2 раза более высокую, чем болты, отожжённые после накатывания [1]. В упрочнённых деталях с концентраторами при достаточно больших переменных напряжениях, близких к пределу выносливости, обнаруживаются нераспространяющиеся трещины усталости, которые останавливаются в своём развитии [2].

В данной работе было исследовано поведение нераспространяющейся трещины усталости в болтах с резьбой М10 из стали 16ХСН с остаточными напряжениями после накатывания резьбы на отожжённой заготовке. В исследовании использованы результаты измерения остаточных напряжений, которые определялись методом колец и полосок [3] (рис. 1). Необходимый объём расчётов выполнен методом конечно-элементного моделирования в среде комплекса ANSYS. Первоначальные остаточные деформации по толщине упрочнённого поверхностного слоя задавались методом термоупругости [4]. Моделировалась резьбовая деталь с кольцевой трещиной в осесимметричной постановке.

Вначале была получена зависимость коэффициента интенсивности напряжений (КИН) от глубины трещины l . Результаты расчётов приведены на рис.2. Расчёты выполнены при следующих параметрах асимметричного положительного цикла: среднее напряжение $\sigma_m = 350$ МПа, предельная амплитуда $\sigma_{Ra} = 93$ МПа (соответствует результатам испытаний на усталость).

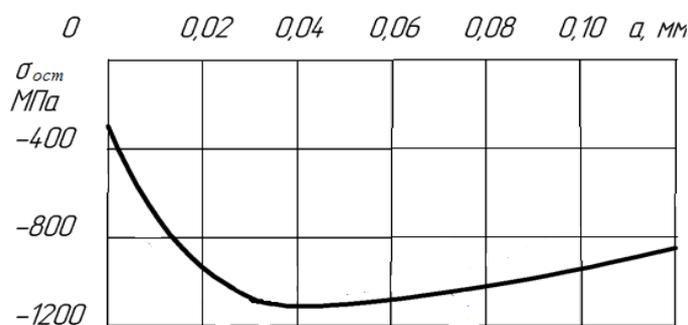


Рис. 1. Остаточные напряжения во впадинах накатанной резьбы М10
в деталях из стали 16ХСН

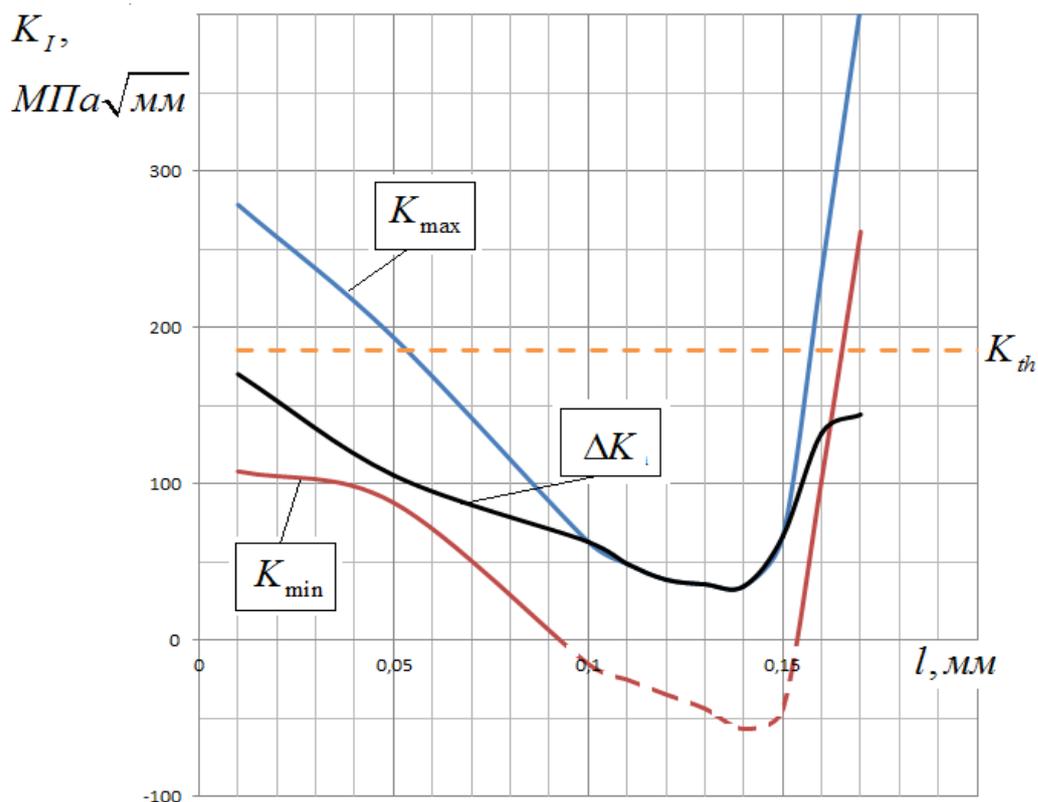


Рис. 2. Зависимость КИН от глубины трещины l для болта М10 из стали 16ХСН с остаточными напряжениями после накатывания резьбы

На рис. 2: K_{max} – максимальное значение КИН при наибольшем напряжении цикла; K_{min} – минимальное значение КИН при наименьшем напряжении цикла; ΔK – размах КИН, равный разности между его наибольшим и наименьшим значениями за цикл напряжений.

Критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости для наименьшего сечения впадины резьбы М10 составляет $t_{кр} = 0,176$ мм [2]. Из графиков рис. 2 следует, что размах КИН имеет локальный минимум и данный размер трещины входит в его диапазон. Можно сделать вывод, что остановка трещины произойдёт, так как размах КИН меньше его порогового значения K_{th} .

На втором этапе было исследовано поведение нераспространяющейся трещины усталости на размере $t_{кр}$ в размахе напряжений предельного цикла в диапазоне от $\sigma_{min} = 257$ МПа до $\sigma_{max} = 443$ МПа при среднем напряжении $\sigma_m = 350$ МПа. Необходимо отметить, что в детали без остаточных напряжений трещина изначально открыта и её берега не соприкасаются между собой на протяжении всего цикла напряжений. На рис. 3 – 5 приведены фрагменты напряжённо-деформированного состояния конечно-элементной модели во впадине резьбы со сжимающими остаточными напряжениями после накатывания.

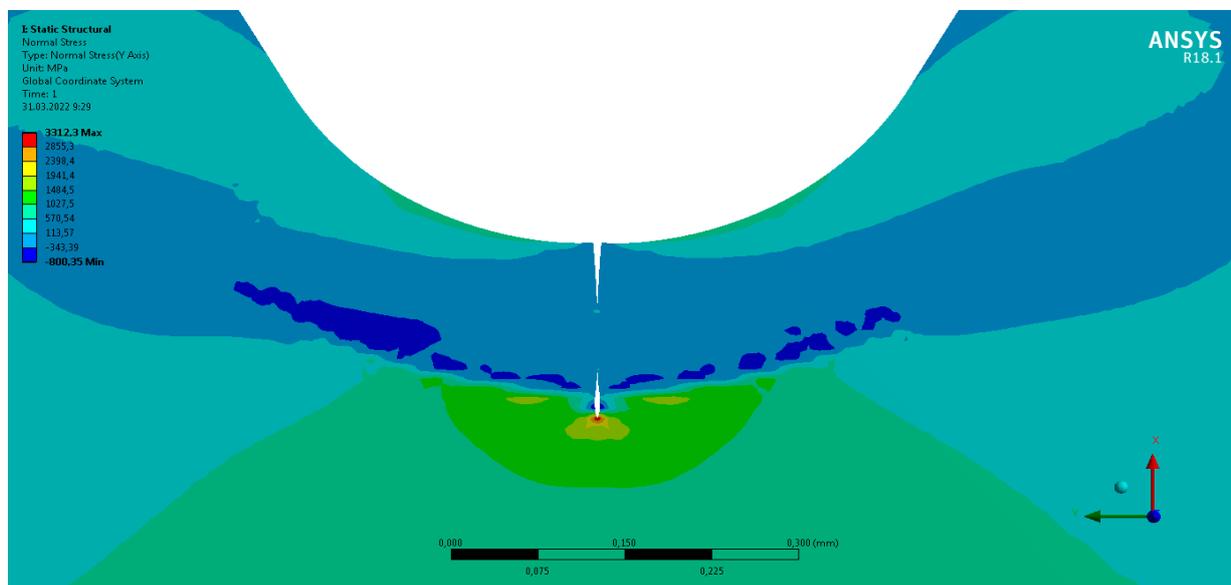


Рис. 3. Напряжённо-деформированное состояние во впадине резьбы при действии напряжения цикла $\sigma = 350$ МПа

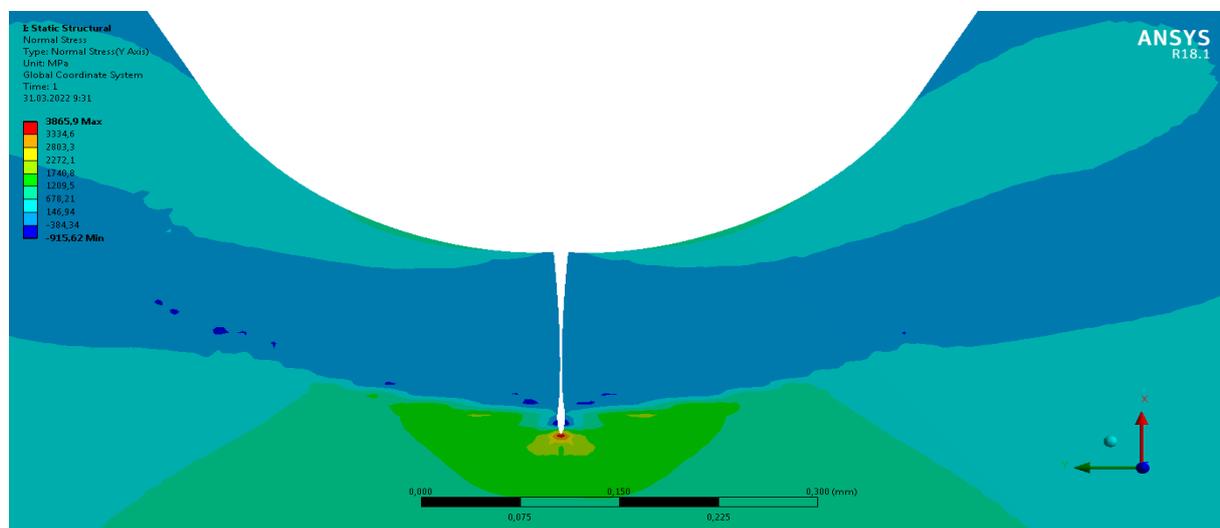


Рис. 4. Напряжённо-деформированное состояние во впадине резьбы при действии напряжения цикла $\sigma = 400$ МПа

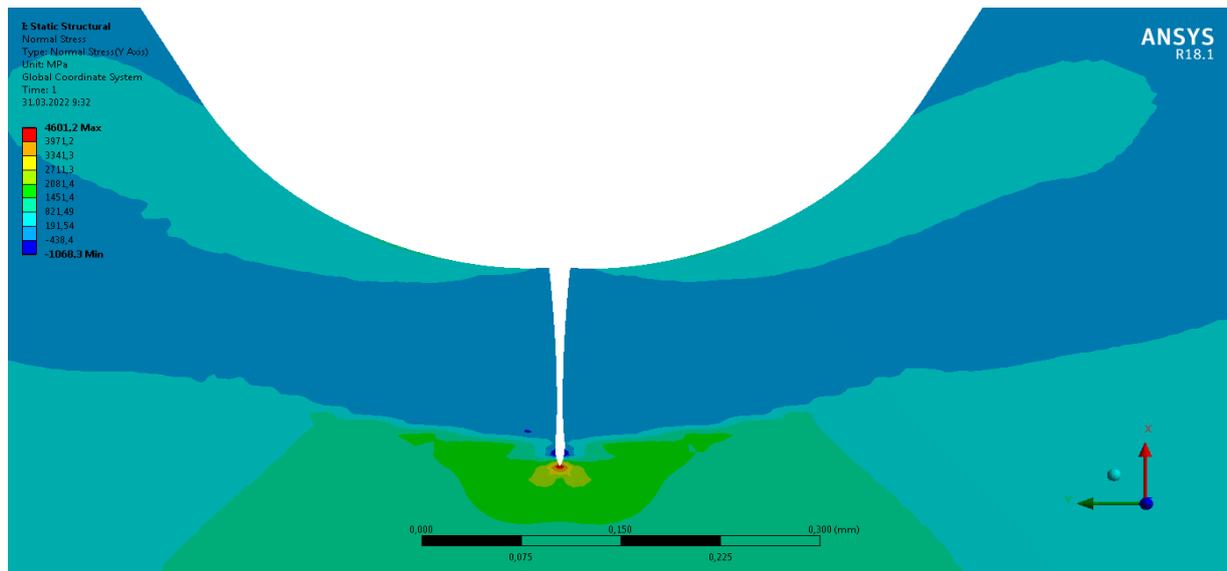


Рис. 5. Напряжённно-деформированное состояние во впадине резьбы при действии напряжения цикла $\sigma = 443$ МПа

По результатам расчёта установлено, что контакт берегов трещины завершается при напряжении цикла около 390 МПа. Отсюда следует, что сжимающие остаточные напряжения во впадине резьбы значительно изменяют поведение усталостной трещины в процессе изменения напряжений цикла. Уменьшение коэффициента интенсивности напряжений вызывает снижение скорости роста трещины, её остановку и всё это приводит к существенному повышению предела выносливости.

Библиографический список

1. Иванов, С.И. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, Б.В. Минин, В.А. Кирпичёв, Е.П. Кочеров, В.В. Головкин. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2015. – 170 с.
2. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
3. Иванов, С.И. Определение остаточных напряжений в резьбе болтов методом колец и полосок / С.И. Иванов, Н.Г. Трофимов, Э.И. Фрейдин, В.Г. Фокин, М.П. Шатунов // Вестник машиностроения. – 1980. – №5. – С. 37-38.
4. Сазанов, В.П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN / В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – №2(68). – С. 35-40.