

УДК 621.09

DOI: 10.12737/article_591947e238a398.97451989

В.Ф. Макаров, д.т.н.,

С.П. Никитин, к.т.н.,

М.В. Песин, к.т.н.,

А.С. Горбунов, аспирант

(ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., д.29)

E-mail: makarovv@pstu.ru

Влияние локальных технологических концентраторов напряжений на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей

Предложены методы снижения величины концентраторов напряжений на основе применения различных методов локального поверхностно-пластического деформирования поверхностного слоя переходных зон сложных профилей обрабатываемых деталей. Это позволяет значительно сократить вероятность образования усталостных трещин и существенно повысить усталостную прочность деталей.

Ключевые слова: технологические концентраторы напряжений; профильные поверхности; локальные переходные зоны; усталостная прочность; резьба; шестерни; турбинные лопатки.

V.F. Makarov, D. Eng.,

S.P. Nikitin, Can. Eng.,

M.V. Pesin, Can. Eng.,

A.S. Gorbunov, Post graduate student

(FSEI HE Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky Avenue, Perm, Russia, 614990)

Impact of local technological concentrators of stresses upon operation properties of parts worked

It is defined that during the machining of complex surfaces in parts operating under large fluctuating loads, in critical transition areas of profile conjugate surfaces there are formed local technological concentrators of stresses contributing to formation, development of fatigue cracks and to further destruction of parts in the course of operation. Such phenomena are discovered, for instance, at high-loaded gear teeth machining, at turbine blade profile surface machining, at manufacturing large-modular tapered threads and other parts having complex profile surfaces.

There are developed and introduced methods for value decrease of such stress concentrators on the basis of the application of different methods for local surface plastic deformation of a surface layer in transition areas of profiles. As a result the probability of fatigue crack formation decreased considerably and fatigue strength in parts machined increased essentially.

Keywords: stress technological concentrators; profile surface; local transition areas; fatigue strength; thread; gears; turbine blades.

В современном машиностроении наиболее сложным и ответственным является производство газотурбинных двигателей, авиационных редукторов и трансмиссий. С каждым годом растут требования к безопасности полётов военной и гражданской техники, что в свою

очередь, отражается на ужесточении требований к показателям надежности, предъявляемые к агрегатам и изделиям в целом.

Надежность авиационной техники во многом зависит от эксплуатационных свойств таких наиболее ответственных деталей ГТД как

лопатки турбины и компрессора, зубчатые колеса, ступенчатые валы, резьбовые соединения, которые работают в тяжелых условиях агрессивных сред, повышенных температур и знакопеременных нагрузок.

В то же время для перечисленных деталей имеется одна характерная особенность. Все эти детали имеют сложные профильные поверхности с присутствием конструктивного концентратора напряжений, которые обрабатываются часто по профильной схеме методом врезания профильным инструментом. В результате сопряженные поверхности обрабатываемого профиля имеют принципиальные отличия условий контакта и резания соответствующими поверхностями профильного режущего инструмента.

Вследствие этого на контактных поверхностях инструмента и детали создаются различные термодинамические условия резания и стружкообразования, что может вызвать появление значительной неоднородности параметров качества поверхностного слоя в переходной зоне – остаточных напряжений, микротвердости, шероховатости, структурной неоднородности.

Эти явления вызывают возникновение технологических концентраторов напряжений в переходных зонах профиля, как раз в тех местах, где уже действуют обычные конструктивные концентраторы напряжений, связанные с резким изменением формы профиля детали. В результате возможно сложение технологического и конструктивного концентраторов напряжений, что приводит к ускоренному появлению и накоплению различных дефектов в поверхностном слое.

В результате суммирования конструктивного и технологического концентраторов напряжений существующие при резании дефекты в поверхностном слое переходной зоны профиля, объединяясь в микротрещины, под действием знакопеременных нагрузок приводят к появлению усталостных трещин, что, в конечном счете, приводит к разрушению деталей при испытаниях и в эксплуатации. Известно, что разрушение детали начинается с поверхностного слоя, и именно поверхностному слою ответственных деталей, имеющих сложные профильные поверхности следует уделять особое внимание в процессе их изготовления.

Эксплуатационный режим работы, например, спирально-конических шестерен (рис.1) характерен малой протяженностью по времени и высокими нагрузками на шестерню при запуске ГТД. В результате зубья шестерен испытывают значительные циклические изгибающие нагрузки. Качество поверхностного слоя во впадинах и на боковых контактных

поверхностях зубьев, риски во впадинах и на торцевых фасках зубьев, безусловно, влияют на первоначальное зарождение усталостных трещин при циклических нагрузках, снижение усталостной прочности и возможное разрушение зубчатых колес в процессе эксплуатации.



Рис. 1. Общий вид спирально-конической шестерни ГТД и впадины зубьев со следами механической обработки

Анализ случаев появления трещин и разрушения шестерен ГТД при испытаниях и в эксплуатации показал, что разрушение носит усталостный характер с зарождением усталостной трещины в переходной зоне профиля зубьев от впадины к боковой поверхности [1, 2].

Для определения наиболее опасных участков и величины опасных напряжений с позиции зарождения микротрещин и снижения усталостной прочности с помощью программы ANSYS проведено математическое моделирование возникающих циклических напряжений от действия на зубья изгибающих моментов в процессе работы зацепления.

Величина образующихся напряжений для прямого зацепления определяется известной зависимостью [1, 2]:

$$\sigma_{из} = \frac{M_{из}}{W_{из}} = \frac{6P_a h_x \cos \gamma_k}{BS_1^2}, \quad (\text{МПа})$$

где $M_{из}$ – изгибающий момент; $W_{из}$ – момент сопротивления изгибу; h_x – плечо изгиба; S_1 – толщина зуба в опасном сечении; B – ширина зубчатого венца; P_a – нагрузочная сила, действующая по линии зацепления; γ_k – угол наклона действующей нагрузочной силы P_a .

В результате проведенных расчетов установлено циклическое образование сжимающих и растягивающих напряжений. Наиболее опасное значение растягивающих напряжений наблюдается в радиусе перехода от впадины к боковой поверхности зуба. Именно в этой зоне имеют место наибольшие растягивающие напряжения от действия изгибающего момента в условиях эксплуатации.

Повышение изгибной и усталостной прочности зубьев за счет дополнительного повышения расчетного конструктивного коэффициента запаса прочности путем увеличения

габаритов зубьев и веса деталей для авиации весьма неэкономично. Поэтому наиболее эффективными являются технологические методы повышения надежности и ресурса работы шестерен.

В результате анализа опыта изготовления зубчатых колес установлено, что имеет место разная схема формообразования боковой поверхности зуба и поверхности дна впадины зуба, что вызывает различие свойств и параметров качества поверхностного слоя. Оценка пооперационного формирования остаточных напряжений поверхностных слоев во впадине и на боковой поверхности шестерни, сделанная на основе анализа производственного опыта и расчета величины и характера распределения по данным научных исследований (рис. 2) [2, 3], позволяет сделать вывод о том, что в переходной зоне формируется дополнительный технологический концентратор напряжений (ТКН), обусловленный резким переходом растягивающих остаточных напряжений от +200 МПа на боковой поверхности зуба до высоких сжимающих остаточных напряжений -700 МПа на дне впадины зуба.

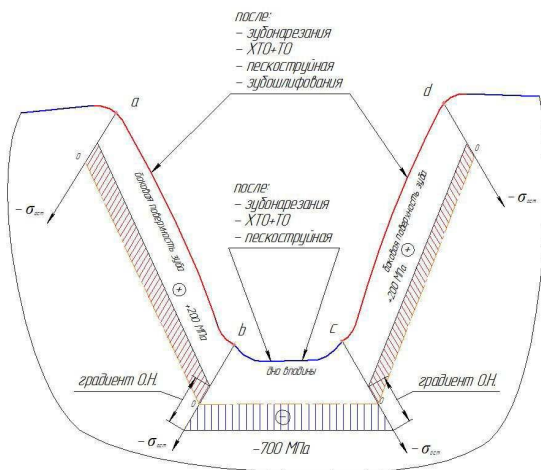


Рис. 2. Расчетные эпюры пооперационного формирования остаточных напряжений на боковых поверхностях и на дне впадины зуба шестерни

При циклическом воздействии изгибающего момента при эксплуатации этот технологический концентратор усиливается периодически действием конструктивного концентратора, что и может служить источником зарождения первоначальных усталостных трещин и последующего разрушения деталей.

Была выдвинута гипотеза, что снижение ТКН и выравнивание напряжений в критической переходной зоне возможно путем введения дополнительной финишной операции упрочнения впадины зуба методом поверхностно-пластического деформирования (ППД).

Установлено, что обработка дробью является наиболее рациональным локальным ме-

тодом повышения сопротивления усталости зубчатых колес [4].

Применение обработки дробью способствует снижению величин градиентов основных параметров качества поверхностного слоя и формированию благоприятных сжимающих остаточных напряжений с необходимой величиной и распределением по глубине в области смежных поверхностей зуба. Технологические сжимающие остаточные напряжения противодействуют изгибным напряжениям растяжения, возникающим при эксплуатационной нагрузке, что в свою очередь существенно повышает предел выносливости, усталостную прочность и долговечность шестерен.

На основе экспериментальных исследований наиболее рационального упрочняющего процесса пневмодробеструйной обработки установлены эмпирические зависимости влияния условий обработки (величина нагружения и время обработки) на величину образующихся остаточных напряжений, определены оптимальные условия обработки, позволяющие направленно сформировать необходимые параметры качества поверхностного слоя во впадинах и на боковых поверхностях зубьев шестерен для снижения действия технологического концентратора напряжений.

Определение предела выносливости проводилось на вибрационном электродинамическом стенде «ВЭДС-400А» при изгибных колебаниях по симметричному циклу напряжений с частотой основного тона на специальных образцах (рис. 3), вырезанных из обода шестерен с упрочнением и без упрочнения.

В результате проведенных усталостных испытаний установлено, что применение локального направленного упрочнения дробью переходных зон от впадины к боковой поверхности зубьев шестерен повышает предел выносливости на 15...20 % по сравнению с прежним серийным маршрутом обработки.

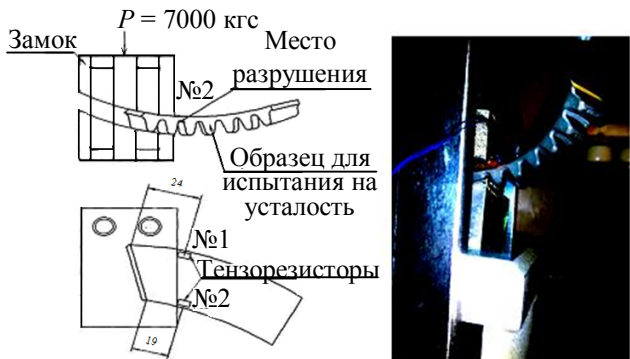


Рис. 3. Схема наклейки тензорезисторов с базой 5 мм на образцах и установки образцов для усталостных испытаний на вибрационном электродинамическом стенде типа ВЭДС-400А

В результате проведенных усталостных ис-

пытаний установлено, что применение локального направленного упрочнения дробью переходных зон от впадины к боковой поверхности зубьев шестерен повышает предел выносливости на 15...20 % по сравнению с прежним серийным маршрутом обработки.

Таким образом, благоприятное воздействие метода ППД и формирование высоких остаточных напряжений сжатия снижает вероятность появления усталостных трещин и способствует увеличению усталостной прочности шестерен ГТД.

Аналогичные исследования проведены при разработке методики назначения оптимальных режимов глубинного шлифования елочных профилей турбинных лопаток [5]. Наиболее распространенным видом соединения рабочей лопатки и диска турбины является «елочный замок», обеспечивающий равномерное распределение передаваемой нагрузки при небольшом удельном давлении на рабочих поверхностях соединения.

На рис. 4 показаны общий вид рабочей лопатки турбины и конструкция хвостовика типа «елка» с пятью парами зубьев. При обработке требуется обеспечить высокую точность профиля $\pm 0,05$ мм и низкую шероховатость $Ra \leq 1,25$ мкм. Для выполнения елочного профиля на замке лопатки применяется профильная схема врезного многопроходного глубинного шлифования с постепенным снятием припуска глубиной по первой впадине елочного профиля замка до 5...6 мм.

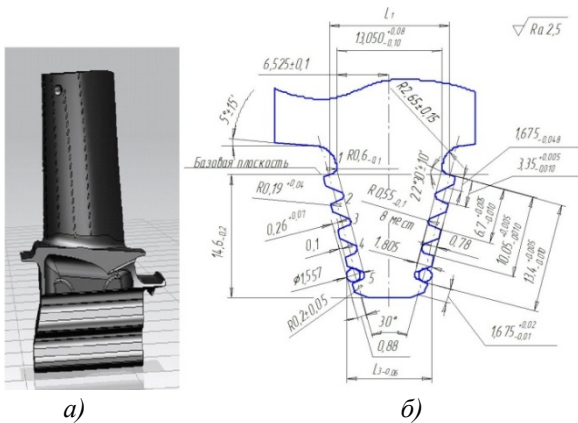


Рис. 4. Общий вид рабочей лопатки турбины ГТД (а) и елочный профиль замка (б)

Особенностью глубинного шлифования является увеличенная длина дуги контакта шлифовального круга с деталью, что приводит к возрастанию мощности и сил резания, общей тепловой напряженности в зоне резания.

При усталостных испытаниях рабочих лопаток турбин на воздушно-пульсирующем вибростенде, проводимых периодически согласно директивной технологии, обнаружено методом люминесцентного контроля образо-

вание трещин усталостного характера в первой впадине «елочного» профиля.

Трещины в основном начинались в радиусе $R0,6$ перехода от дна впадины к боковой наклонной поверхности первого зуба (рис. 5).

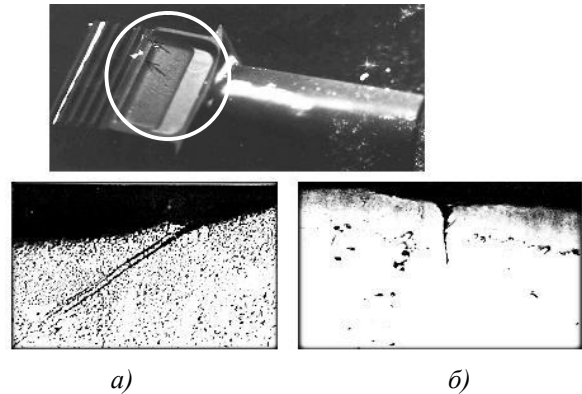


Рис. 5. Характер образования усталостных трещин в первой впадине турбинных лопаток и микрошлифы усталостных трещин:

а – под углом 30° ; б – под углом 90°

При микроструктурном анализе было выявлено, что одни трещины идут под углом 30° к наружной поверхности (рис. 5, а), другие – вглубь металла под прямым углом (рис. 5, б). Причем протяженность этих трещин достигает 9...12 мм, а глубина 0,1...0,4 мм.

Согласно директивной технологии изготовления рабочих лопаток турбин двигателей ПС90 А, ПС90 2А, ПД14 установлено, что основным критерием оптимальности режимов глубинного шлифования елочных замков лопаток является обеспечение установленной регламентом величины предела выносливости σ_{-1} .

Требуемый предел выносливости, установленный для елочных замков лопаток из различных сплавов: ЖС6К, ЖС6У-ВИ – 140 МПа; ЖС26-ВИ, ЧС-70, ЖС36 – 110 МПа в начальный период перехода от фрезерования к глубинному шлифрованию елочных замков на рекомендованных НИИД режимах не был обеспечен. Проблема решалась путем уменьшения глубины резания и увеличения числа проходов с трех до четырнадцати. При этом время обработки одной лопатки значительно увеличилось с 3 до 8 мин.

Предварительные исследования на ОАО «ПМЗ» показали существенную зависимость предела выносливости σ_{-1} от основных параметров шлифования. Различные параметры глубинного шлифования влияют на шероховатость, наклеп и величину градиента остаточных напряжений в тонком поверхностном слое замков лопаток, которые, в свою очередь, влияют на величину σ_{-1} .

При принятой схеме глубинного профильного шлифования контура сложной елочной

формы одновременно обрабатывается несколько смежных поверхностей. При этом на смежных поверхностях реализуются различные кинематические схемы шлифования с различными величинами глубины резания и снимаемыми припусками, с различной длиной дуги контакта шлифовального круга с заготовкой и др.

При рассмотрении схемы профильного глубинного шлифования зубьев елочного профиля можно выделить несколько смежных поверхностей, обрабатываемых одновременно, например, по схеме плоского шлифования периферией круга при обработке впадины и по схеме торцевого шлифования при обработке наклонных торцевых поверхностей зубьев. Это приводит к различию сил резания, действующих на абразивное зерно; упругих и динамических деформаций; величины съема; температур в зоне контакта, которые определяют размерную точность и качество поверхностного слоя, возникновение трещин [5, 6].

Длина контактной линии шлифовального круга и заготовки для каждой боковой поверхности и впадины канавки различны. При шлифовании дна впадины длина дуги АК и площадь контакта в несколько раз меньше, чем при шлифовании боковых поверхностей торцем круга.

Вследствие увеличения длины дуги контакта длительность воздействия абразивных зерен на металл возрастает. Все это приводит к большему увеличению температуры шлифования на торцевых поверхностях, чем на дне впадины и соответствующему большему росту растягивающих остаточных напряжений.

Возникает технологический концентратор напряжений в переходной радиусной зоне. При действии знакопеременных нагрузок в условиях эксплуатации этот концентратор напряжений складывается с циклически возникающим конструктивным геометрическим концентратором напряжений и создает условия для образования усталостных трещин в критической радиусной переходной зоне и разрушения лопаток турбины.

Для снижения действия этого технологического концентратора напряжений и повышения сопротивления усталости после обработки глубинным шлифованием предложено применять процесс упрочнения профиля хвостовика микрошариками на пневмодробеструйной установке (рис. 6) [4].

Обработка деталей равномерным потоком микрошариков фракции 0,10...0,35 мм со скоростью 50...80 м/с создает на поверхности неориентированный микрорельеф, шероховатость $Ra = 1,25...2,5$ мкм, остаточные напряжения сжатия и наклеп 15...30 %.

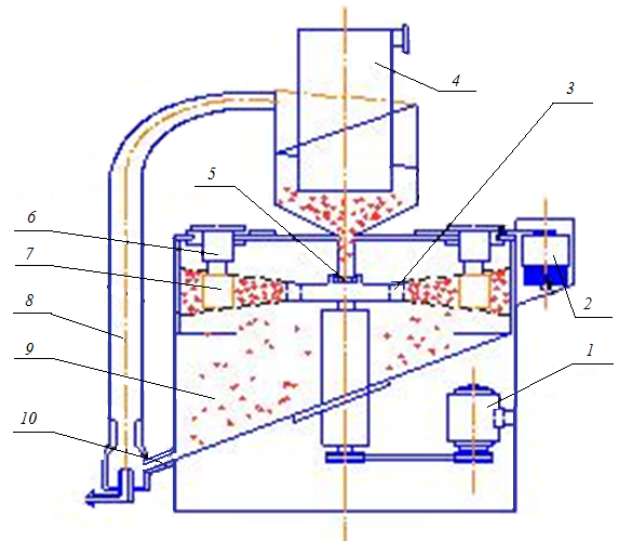


Рис. 6. Общая схема специальной дробеструйной установки для упрочняющей обработки елочных замков турбинных лопаток:

1 – электродвигатель $N > 0,5$ кВт,
 $n = 1500...4000$ об/мин;
 2 – электродвигатель $N > 0,5$ кВт; 3 – ротор-дробемет;
 4 – вентиляция; 5 – жиклер; 6 – приспособление для крепления лопатки; 7 – лопатка; 8 – элеватор; 9 – накопитель; 10 – инжектор

В результате проведения дробеструйного упрочнения микрошариками «елочного» профиля хвостовика и последующих усталостных испытаний турбинных лопаток и образцов-имитаторов «елочного» хвостовика при нормальной (20 °С) и рабочей температурах (650...700 °С) установлено, что предел выносливости после упрочнения повышается на 20...25 % при нормальной температуре, а при рабочей температуре происходит увеличение на 60 % (рис. 7).

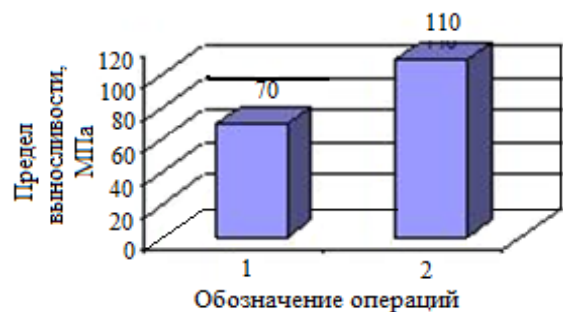


Рис. 7. Изменение сопротивления усталости после операций шлифования:

1 – без упрочнения; 2 – с упрочнением

Влияние режимов обработки на возникновение технологических концентраторов напряжений и усталостную прочность резьб исследовалось на примере обсадных и насосно-компрессорных труб.

Для осуществления процесса бурения и подачи углеводородов на поверхность применяются большая номенклатура специальных буровых, обсадных и насосно-компрессорных труб, соединенных в многокилометровые колонны с помощью резьбовых соединений в виде муфт и ниппелей со специальной конической резьбой (рис. 8, а).

В процессе бурения и подачи энергоносителей на поверхность резьбовые соединения буровых труб также испытывают значительные знакопеременные нагрузки от действия растягивающих сил, изгибающих моментов, химического и абразивного воздействий, что приводит к нередким случаям поломки труб по резьбовым соединениям и обрыву многотонной колонны в скважинах.

Анализ мест разрушения показал, что разрушение резьб носит усталостный характер в основном в зоне впадины резьбы, где начинается рост усталостных трещин (рис. 8, б) [7, 8].

Одной из проблем при нарезании конической резьбы на ниппеле и муфте, является низкая стойкость инструмента, быстрая поломка и нехарактерный износ для данного процесса резания. Изготовление конической резьбы проводится методом врезного профильного многопроходного нарезания на токарно-винторезном станке SCT 22100 с ЧПУ сборными резацами с механическим креплением специальных трехгранных профильных резьбовых пластинок фирмы Sandvik. Процесс обработки идет с охлаждением СОЖ поливом.

Профиль резьбы ниппеля (4:1)
ГОСТ Р 50864-96

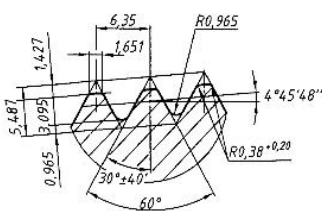


Рис. 8. Конструктивные особенности профиля резьбы буровых труб (а) и общий вид усталостного разрушения резьбы (б)

В результате анализа износа и образующейся стружки на боковых режущих кромках и на вершине выявлено значительное отличие температурных и деформационных явлений, что связано с различной кинематикой резания. Несвободное резание радиусной вершиной резца происходит в сложных условиях трехстороннего сжатия с формированием дна впадины резьбы методом поперечного врезного точения канавок. При этом образуется деформированная вытянутая корытообразная стружка сине-зеленого цвета, что свидетельствует о высокой, порядка 500..600 °С, температуре резания.

Резание боковыми режущими кромками резца является свободным резанием с образованием широкой плоской спиральной стружки светлого цвета, что свидетельствует о значительно меньшей деформации и температуре 250...300 °С.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в процессе нарезания резьбы в поверхностном слое дна впадины и на боковых поверхностях резьбы формируются различные параметры качества: шероховатость, остаточные напряжения и наклеп. Установлено, что на дне впадин наблюдаются более глубокие риски от режущего инструмента, чем на боковых поверхностях нарезанной резьбы.

Таким образом, можно констатировать факт образования технологического концентратора напряжений в переходной зоне от дна впадины к боковой поверхности, что в условиях действия изгибных знакопеременных нагрузок и при наличии конструктивного геометрического концентратора напряжений может усиливать вероятность образования усталостных трещин и последующего разрушения резьбы.

Для снижения действия технологического концентратора напряжений предложено ввести поверхностно-пластическую деформационную обработку путем обкатки предварительно нарезанной резьбы роликом по схеме (рис. 9).

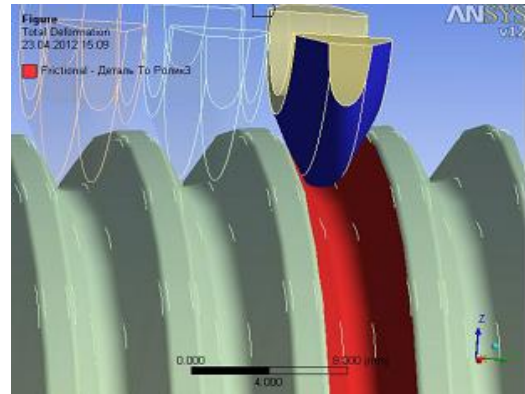


Рис. 9. Схема процесса обкатки наружной резьбы роликом

Ролик для обкатывания впадин конической замковой резьбы имеет круглый профиль без заходной поверхности с торовой симметричной рабочей поверхностью, соответствующей форме профиля впадины резьбы и обеспечивает деформирование, как боковых поверхностей, так и дна впадины резьбы.

В данной работе критерием степени упрочнения является увеличение высоты профиля резьбы h_1 . В результате упрочнения повышаются твердость и прочность поверхностного слоя, формируются благоприятные остаточные напряжения, уменьшается параметр ше-

роховатости Ra , увеличиваются радиусы закругления вершин, относительная опорная длина профиля и т.п.

Остаточные напряжения сжатия, возникающие во впадинах резьбы, уменьшают чувствительность к концентрации напряжений и асимметрии цикла переменных изгибающих напряжений в шипе свинченного соединения.

При рассмотрении поверхностного слоя резьбы впадин видно, что после упрочнения количество мелких дефектов во впадинах резьбы уменьшается. Поверхность профиля резьбы во впадинах витков гладкая, приглаженная, без следов шероховатостей и воздействий режущего инструмента. Необходимо заметить, что процесс обкатки впадины витков резьбы не приводит к существенному изменению твердости и толщины наклепанного слоя. Преимущество этого процесса состоит в том, что поверхностный слой материала изделия становится ровным, равномерным по профилю и сглаженным по рельефу.

Испытания на усталостную прочность при знакопеременной изгибной нагрузке резьбового соединения проводились на стендовых установках для плоского или кругового изгиба по согласованной методике.

При анализе сравнительных усталостных испытаний установлено увеличение наработки обкатанного резьбового соединения над неупрочненным в 2,7...3,7 раза; с 700 тыс. циклов до 3900 тыс. циклов. Таким образом, применение разработанной технологии упрочняющей обработки повышает усталостную прочность и надежность бурильных труб более чем в 3 раза.

Выводы

1. В процессе профильной механической обработки поверхностей сложного профиля деталей, работающих в эксплуатации при больших знакопеременных нагрузках, в критических переходных зонах сопряженных поверхностей профиля образуются локальные технологические концентраторы напряжений, способствующие зарождению, росту усталостных трещин и последующему разрушению деталей в эксплуатации.

2. Такие явления обнаружены, например, при обработке высоконагруженных зубьев шестерен, при обработке профильных поверхностей лопаток турбин, при изготовлении крупных конических резьб и других деталей, имеющих сложные профильные поверхности.

3. Разработаны и внедрены методы снижения величины таких концентраторов напряжений на основе применения различных методов локального поверхностно-пластического деформирования поверхностного слоя переходных зон профилей.

4. В результате реализации предложенных технологий значительно сократилась вероятность образования усталостных трещин и существенно повысилась усталостная прочность обработанных деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров, В.Ф., Горбунов, А.С. Повышение ресурса и надежности работы спирально-конических шестерен путем применения упрочняющей обработки с учетом влияния технологической наследственности // Труды междунар. науч.-техн. конф. «Современные наукоемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении». СПбГПУ. 17-19 сентября 2014г.. С. 369 – 378.
2. Горбунов, А.С., Макаров, В.Ф. Влияние последовательности обработки спирально-конических шестерен на распределение остаточных напряжений и величину наклепа поверхностного слоя зубьев // Технология машиностроения. – 2012. – №3. – С. 9 – 12.
3. Тамаркин, М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами. Дис. докт. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1995 г.
4. Папшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
5. Поletaev, В.А., Волков, Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотечка технолога. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.
6. Никитин, С.П. Теоретическое исследование устойчивости при обработке шлифованием // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. – №8(61), – С. 38 – 44.
7. Афонин, А.Н., Киричек, А.В. Схемы деформирования при накатывании резьбы. УДК 621.99 [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.google.ru/>
8. Макаров, В.Ф., Никитин, С.П. Влияние условий формообразования на качество поверхностного слоя лопатки при глубинном профильном шлифовании // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – №8 (50). – С. 38-44.

REFERENCES

1. Makarov, V.F., Gorbunov, A.S. Resource and reliability increase in operation of spiral bevel gears by use of strengthening machining taking into account technological heredity influence // *Proceedings of the Inter. Scientific Technical Conf. "Modern Science Intensive Technologies, Equipment and Tools in Mechanical Engineering"*, S-PbTU, September 17-19, 2014г., pp. 369 – 378.
2. Gorbunov, A.S., Makarov, V.F. Influence of sequence in spiral bevel gear machining upon residual stress distribution and work hardening value of teeth surface layer // *Engineering Technique*. – 2012. – №3. – pp. 9 – 12.
3. Tamarkin, M.A. *Theoretical Fundamentals in Optimization of Parts Treatment with Free Abrasives*. D. Eng. Thesis. Rostov-upon-Don, 1995 г.
4. Papshev, D.D. *Finishing- Strengthening Treatment by Surface Plastic Deformation*. – М.: Mechanical Engineering, 1978. – pp. 152.
5. Poletayev, V.A., Volkov, D.I. *Deep Grinding of Turbine Blades: technologist's library*. – М.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 272.
6. Nikitin, S.P. Theoretical investigation of stability at grinding // *Bulletin of USATU*. – 2013. – Vol. 17. – №8(61), – pp. 38 – 44.
7. Afonin, A.N., Kirichek, A.V. *Deformation Schemes at Knurling*. UDC 621.99 [Electron Resource] / Access mode: <http://www.google.ru/>
8. Makarov, V.F., Nikitin, S.P. Influence of shaping conditions upon blade surface quality at deep profile grinding // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – №8 (50). – pp. 38-44.

Рецензент д.т.н. А.В. Киричек