

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ

Курбатов В. П.

ОАО «Моторостроитель», г. Самара

Как показывает практика эксплуатации газотурбинных двигателей большой процент выхода из строя таких деталей как, например, диски турбин, дефлекторы и др. связан с усталостными разрушениями. Значительное влияние на выносливость этих деталей оказывает качество поверхностного слоя, формируемое в процессе их изготовления. Большой вклад в изучение качества поверхностного слоя и его влияния на усталостные характеристики деталей внесли исследования отечественных и зарубежных ученых.

Связь между остаточными напряжениями и пределом выносливости установлена и не вызывает сомнения, но роль деформационного упрочнения (наклепа) в механизме циклической прочности еще не совсем ясна. Так, например, по данным И.А. Одингга и А.И. Ефремова сквозное деформационное упрочнение образцов независимо от того каким путем оно наведено (сжатием, растяжением или комбинацией этих деформаций) вызывает повышение предела выносливости как при малых, так и при значительных деформациях (до 20% удлинения или сжатия). Аналогичные данные можно найти в работах И.В. Кудрявцева. В этих работах указывается, что даже незначительное деформационное упрочнение углеродистой стали (до предела текучести) уже заметно повышает ее предел выносливости.

Однако имеются исследования, из которых вытекает более сложная связь между деформационным упрочнением и пределом выносливости. По данным Н.И. Черняка при малых деформациях образцов (растяжением) наблюдается снижение предела выносливости.

Как следует из анализируемой работы, для стали 12ХН3А предел выносливости недеформированных образцов ($\sigma_B = 725$ МПа, $\delta = 17,6\%$, $\psi = 43,8\%$) в интервале деформаций 0..1,5% падает. Еще большее снижение предела выносливости имеет место для образцов из стали 40Х ($\sigma_B = 841$ МПа, $\sigma_{0,2} = 504$ МПа, $\delta = 18,0\%$, $\psi = 66,6\%$). Для этой стали деформация удлинением вплоть до 12% снижает исходный предел выносливости ($\sigma_{-1} = 365$ МПа). Аналогичные результаты имеют место и при исследовании деформированных образцов из сталей марок ст.45 и 15ХСНД. В подтверждение своих выводов Н.И. Черняк ссылается на исследования Н.Н. Афанасьева, Mateolli. По данным этих работ для образцов из хромо-

никелевой стали при деформации растяжением в 1% предел выносливости снижается на 9,5%. Для хромомолибденовой и углеродистой сталей при той же деформации (1%) предел выносливости снижается соответственно на 16,7% и 22,6%.

Результаты опытов, изложенные выше, выполнены известными исследователями и с точки зрения достоверности, не вызывают сомнения. Тем не менее, необходимо отметить несоответствие в оценке роли деформационного упрочнения, вытекающее из этих работ.

Следует, однако, заметить, что в этих работах имеют место методические отличия в изготовлении образцов для исследований.

В работах И.А. Одингга, И.В. Кудрявцева образцы для исследования влияния деформационного упрочнения на предел выносливости изготавливались из прутков, предварительно деформируемых до требуемого удлинения (или укорочения).

В исследованиях Н.И. Черняка и др. образцы для испытаний окончательно изготавливались, а затем подвергались деформации (удлинению).

Как показано в работах Б.А. Кравченко, это отличие в изготовлении образцов является причиной несоответствия конечных результатов. Дело в том, что усталостные образцы имеют определенную геометрическую форму, которая создается путем механической обработки с последующей доводкой, например абразивной шкуркой. Так, при точении, фрезеровании на поверхности усталостного образца в тонком поверхностном слое формируется новое деформационное упрочнение и, как следствие, остаточные напряжения. Причем, как деформационное упрочнение, так и остаточные напряжения, возникающие вследствие обработки, зависят от материала и его прочностных свойств. Для материалов с кристаллографическим строением в виде кубической решетки после точения возникают растягивающие остаточные напряжения. Предварительная деформация заготовок изменяет пластические свойства исходного материала, что выражается в уменьшении отношения $\sigma_B/\sigma_{0,2}$, так как у деформируемых заготовок исходное значение $\sigma_{0,2}$ растет с увеличением относительного удлинения.

Уменьшение пластических свойств содействует изменению процесса стружкообразования, что может привести к наведению при определенных значениях относительного удлинения остаточных напряжений сжатия. Опытным путем установлено, что для состояния материала, при котором $\sigma_B/\sigma_{0,2} > 1,25$, при резании формируются растягивающие остаточные напряжения, а при $\sigma_B/\sigma_{0,2} < 1,25$ - напряжения сжатия тем боль-

шие по своим абсолютным значениям, чем меньше отношение $\sigma_B/\sigma_{0,2}$. В подтверждение сказанному можно привести нижеследующее исследование. Из жаростойкой стали 1X18H9T, характеризующейся относительным удлинением $\delta=50-60\%$, были нарезаны призматические образцы с размерами $l=200$ мм, $b=10$ мм, $h=4,0$ мм. Затем часть этих образцов на разрывной машине были деформированы до относительных величин $\delta=5, 10, 15, 20\%$. В дальнейшем все образцы подвергались фрезерованию ($\psi=45^\circ$; $\gamma=+10^\circ$; $v=15$ м/мин; $t=0,5$ мм; $S_z=0,22$ мм/зуб) и на основании полученных результатов построены эпюры напряжений. Из анализа этих данных следует, что на исходном, недеформированном образце возникли растягивающие остаточные напряжения $\sigma_0 = +360$ МПа. Для образцов, деформированных до величин $\delta=5\%$ и $\delta=10\%$, характерны меньшие значения растягивающих остаточных напряжений, соответственно равных: $\sigma_0=+300$ МПа и $\sigma_0=+160$ МПа. У поверхности напряжения ниже: $\sigma_0=+120$ МПа и $\sigma_0=+30$ МПа. На образцах, предварительно деформированных до величин $\delta \geq 15\%$, на поверхности формируются только остаточные напряжения сжатия $\sigma_0 > 200$ МПа.

В свете этих данных, можно сделать такое заключение: в опытах И.А.Одинга и И.В. Кудрявцева при изготовлении усталостных образцов с увеличением относительных деформаций в исходных заготовках остаточные напряжения сжатия снижались и при определенных значениях относительно удлинения изменяли свой знак, переходя в область сжатия. Такой характер изменения остаточных напряжений при изготовлении усталостных образцов приводил к ошибкам в сторону увеличения предела выносливости, так как остаточные напряжения сжатия содействуют его повышению.

В опытах Н.И. Черняка и др. деформировались (удлинялись) окончательно изготовленные усталостные образцы, на поверхностях которых, вследствие изготовления, формировались растягивающие остаточные напряжения.

Удлинение образцов (деформация) изменяло напряженное состояние поверхностного слоя и, при определенных (относительно небольших) деформациях, исходное различие качества поверхностного слоя и основного сечения образца нивелировалось. Поэтому результаты, полученные в работах Н.И. Черняка, Н.Н. Афанасьева ближе к реальным, чем аналогичные результаты, изложенные в монографиях И.А. Одинга, И.В. Кудрявцева. Немонотонный характер изменения предела выносливости с ростом относительного удлинения Н.И. Черняк усматривает в изгибе ус-

галостных образцов при их удлинении на разрывных машинах. Однако отмеченные изгибы не могут повлиять на σ_{-1} в той степени, которая наблюдается в опытах.

Сопоставление приведенных методик изготовления образцов и их влияние на σ_{-1} провел Б.А. Кравченко. Стандартные круглые образцы изготавливались из стали 40ХМНФА ($\sigma_B = 825$ МПа, $\sigma_{0,2} = 630$ МПа, $\delta > 12,3\%$). В партии образцов по первой методике удлинялись заготовки. В партии образцов по второй методике исследования удлинялись образцы. Толщина слоя с деформационным упрочнением, возникшим при изготовлении образцов, измерялась на косых срезах (ПМТ-3) и не превышала $\Delta h = 150$ мкм. В дальнейшем все образцы обеих партий на специальном приспособлении электрополировались снимался слой $\Delta h = 250$ мкм. В этих опытах было установлено, что электрополированные образцы, независимо от методики изготовления при одинаковых относительных удлинениях показали один и тот же предел выносливости (σ_{-1}).

Влияние относительного удлинения на предел выносливости характеризуется начальным падением σ_{-1} , а затем, по достижении определенной величины относительного удлинения ($\delta\%$), его ростом. Однако, это повышение, как правило, не достигает значения σ_{-1} , характерного для недеформированных образцов ($\delta=0$). Таким образом, можно утверждать, что деформационное упрочнение для деталей, изготовленных из углеродистых и легированных сталей, является вредным фактором, так как способствует снижению усталостных характеристик. Наблюдаемое снижение σ_{-1} достигает 20...25%.

Деформированный слой с максимальным падением σ_{-1} находится вблизи поверхности детали. По-видимому, по этой причине зарождение усталостных трещин часто наблюдается на некотором расстоянии от поверхности детали.

Вместе с тем упрочнение детали - наведение в поверхностном слое деталей деформационного упрочнения (наклепа) - приводит к повышению σ_{-1} .

С учетом изложенного установлено, что при упрочнении в поверхностном слое заготовки формируются пластические остаточные напряжения определенной ориентировки - вдоль образующей поверхности, поэтому возникают остаточные напряжения сжатия, которые своим положительным воздействием перекрывают негативное влияние деформа-

ционного упрочнения. При упрочнении поверхности наблюдается повышение σ_{-1} примерно на 10...30%. Ликвидация или снижение вредного влияние деформационного упрочнения, обеспечивает положительный эффект остаточных напряжений ряде случаев почти в два раза.

Следует отметить, что согласно теореме Генки, для того чтобы остаточные напряжения по своей величине достигли значения предела текучести, достаточна относительная деформация частиц поверхностного слоя на уровне $\delta \approx 0,5\%$. Однако, если при обычных методах поверхностного пластического деформирования применить режим, соответствующий $\delta = 0,5\%$, то пластическая деформация возникает в очень, тонком поверхностном слое, соответствующем нескольким мкм, что не приводит к желаемым результатам.

Изложенные выше результаты относятся, в основном, к упрочнению углеродистых и малолегированных сталей. Что касается жаропрочных сплавов на никелевой основе, то имеющиеся исследования не дают права использовать сделанные выводы. В работе А.М. Сулимы, показано, что для жаропрочных сплавов ЭИ617 на никелевой основе деформационное упрочнение на уровне 2...4% относительной деформации приводит к повышению предела выносливости. В то же время, по данным И.Г. Гринченко, выносливость жаропрочных сплавов ЭИ437Б (ХН77ТФР), ЭИ617 (ХН70ВМТЮ) как при нормальной, так и при высокой температуре от наклепа, наведенного растяжением, во всем диапазоне степеней деформации понижается.

В литературе приводятся и другие исследования, из которых следует негативное влияние деформационного упрочнения на усталостные характеристики деталей, в частности работающих в условиях высоких температур. Тем не менее, методы ППД относительно широко используются для упрочнения таких деталей, как дисков турбин, дефлекторов, лопаток и др. Однако в свете имеющихся данных диктуется настоятельная необходимость продолжить исследования в этой области с целью установления целесообразности использования того или иного метода упрочнения, возможности их улучшения, модификации. Сказанное в большой степени относится к новым, современным жаропрочным материалам.

Таким образом, разработка основных теоретических положений, отражающих влияние деформационного упрочнения и остаточных напряжений на усталостные характеристики деталей из жаропрочных сплавов, а также создание научно обоснованных методов их регулирования является важной задачей современного авиадвигателестроения. Для достижения этой цели требуется решать основные следующие задачи:

1. Разработать методику оценки влияния деформационного упрочнения на предел выносливости образцов из жаропрочных сплавов ЭИ437Б, ЭП742УИД.
2. Исследовать остаточные напряжения и деформационное упрочнение при точении и упрочнении микрошариками сплава ЭП742УИД (на дефлекторах и дисках).
3. На базе теоретико-экспериментальных исследований разработать систему мероприятий, обеспечивающих снижение степени деформационного упрочнения при сохранении достаточного уровня сжимающих остаточных напряжений на поверхностях дефлекторов и дисков в процессе их изготовления.
4. Разработать научно обоснованные технологические рекомендации улучшения качества поверхностного слоя дефлекторов и дисков турбин с целью повышения их долговечности.
5. Внедрить результаты разработок в производство.

На примере изготовления дефлектора турбины видно, как влияет последовательность, методы и режимы обработки на качественные показатели этого ответственного элемента ГТД.

Дефлектор по своей конструкции представляет деталь весьма сложной формы с радиусными переходами, в зоне которых концентрируются напряжения.

Дефлектор играет весьма важную роль в системе охлаждения лопаток и дисков турбины. Избыточное давление между диском и дефлектором может достигать значений $\Delta P = 0,27 \dots 0,55$ МПа. Под действием этого давления в межлабиринтной зоне дефлектора возникают значительные напряжения, оценка которых методом конечных элементов дает значения на уровне $\sigma = 600 \dots 700$ МПа. Этот уровень напряжений может изменяться за счет центробежных сил. При этом следует отметить и влияние рабочей температуры при эксплуатации изделия, которая достигает $550 \dots 600^\circ\text{C}$.

Доминирующим процессом при изготовлении дефлекторов является токарная обработка, которая предшествует финишным операциям. Естественно, что поверхностный слой детали, возникающий после точения, определяет качественный показатель готового изделия.

Токарной обработке подвергаются практически все поверхности дефлектора. Однако наиболее сложной операцией представляется точение поверхностей межлабиринтной зоны, которые обрабатываются тремя резцами с радиусами при вершине $r = 3 \dots 5$ мм. Форма лабиринтной зоны такова, что резцы с радиусом при вершине $r = 5,0$ мм контактируют с изделием по дуге $\psi = 90^\circ$, поэтому ширина среза достигает величины $b \approx 8,0$

мм. По этой причине резание сопровождается значительными усилиями и большими удельными контактными нагрузками, что приводит к деформационному упрочнению поверхностных слоев и формированию остаточных напряжений. При этом следует иметь в виду, что жаропрочный сплав ЭП742УИД имеет весьма большую склонность к упрочнению.

Разрушение дефлектора первой ступени турбины в 1990 году определилось усталостными трещинами, возникшими в межлабиринтной зоне. Для установления причин первоначального разрушения, исследованию подверглись три дефлектора, имевших трещины после эксплуатации с наработкой 506, 546, 721 часов соответственно и один дефлектор после 222 часов стендовых испытаний. Эти данные исследования показали, что при изготовлении дефлектора не обеспечивается постоянство параметров качества поверхностного слоя. Так, степень деформационного упрочнения колебалась в пределах $U=25...70\%$. Остаточные напряжения в радиальном направлении соответствовали $s_p = + (150...200)$ МПа, а в окружном направлении - $s_p = + (1000...1200)$ МПа. Эти данные проверялись на специально подготовленных образцах. Формирование остаточных напряжений и деформационного упрочнения при точении исследовалось с использованием реальных дефлекторов. Для первых двух проходов подача равнялась $S = 0,2$ мм/об, а для третьего чистового - $S = 0,15$ мм/об. Глубина резания была постоянной и равнялась 0,3 мм. Обороты диска $n = 10$ об/мин, что соответствует для диапазона диаметров $Ж = 416...516$ мм - скорости $V = 13...16$ м/мин. Последний, 3-й чистовой проход производился острым заточенным резцом с пластиной из твердого сплава ВК80М имеющей следующие геометрические параметры: $\gamma = +10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $r = 5,0$ мм.

Исследование остаточных напряжений на образцах показали, что в окружном направлении формируются растягивающие остаточные напряжения $\sigma_0 = +800$ МПа для резцов с износом до $w = 0...0,3$ мм (серийная технология). Увеличение износа до $w = 0,9$ мм сопровождается ростом остаточных напряжений до величины $\sigma_0 = +1200$ МПа. В радиальном направлении эпюра остаточных напряжений качественно отличается. На обрабатываемой поверхности возникают относительно небольшие растягивающие напряжения $\sigma_0 \approx +150$ МПа, которые на глубине $\Delta a = 20...25$ мкм переходят в напряжения сжатия, достигающие уровня $\sigma_0 = - (300...500)$ МПа.