

Некоммерческое акционерное общество
«Алматинский университет энергетики и связи»

Исламов Фархат Ахатович

**«Исследование концентраторов напряжений в
турбинах электростанций»**

Специальность 6М071700 – Теплоэнергетика (технические науки)

Диссертация на соискание академической степени магистра наук

Научный руководитель – профессор, доктор технических наук, Генбач
Александр Алексеевич

Алматы 2014

Содержание

Введение.....	
1 Обзор работ по концентраторам напряжений.....	
1.1 Образование концентраторов напряжений в турбинах электростанций.....	
1.2 Мероприятия проводимые при ремонте оборудования.....	
1.3 Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела.....	
1.4 Приборы для исследований в проходящем свете.....	
1.5 Об исследовании простейших задач.....	
2 Исследование концентраторов напряжений в турбинах электростанций.....	
2.1 Исследование присопловой галтели в энергетических установках.....	
3 Оценка тепловых потоков, возникающих в концентраторах напряжений турбин электростанций.....	
3.1 Моделирование процесса задевания ротора турбины.....	
3.2 Расчет эффективности управления направленной колкой железобетонных конструкций и горных пород при реконструкции электростанций.....	
3.3 Возможное отклонение трещины в турбофундаментах и крепких горных породах при реконструкции электростанций.....	
3.4 Управление трещинами в железобетонных конструкциях и горных породах при реконструкции электростанции.....	
Заключение.....	
Список использованной литературы.....	

Аннотация

Расшифрованы интерферограммы напряжений для канавки, полученные оптико-поляризационным методом. Построены принципы конструирования канавок. Исследован концентратор напряжения в виде присопловой галтели энергоустановки. Галтель выполнена дугообразной типа прилива диффузорной части сверхзвукового сопла Лавала. Галтель покрыта капиллярно-пористой структурой, вид которой оптимизирован экспериментально. Учтена теплоаккумулирующая способность сопла. Рассчитаны термические напряжения в галтели и определены ее геометрические характеристики.

Annotation:

Decrypted interferograms of stress for the groove obtained by optical-polarization method. Built design principles grooves. The concentrator of tension in the form of the nozzle fillet of power installation is investigated. Fillet is executed by the bow-shaped lug of diffuzorny part of supersonic nozzle Laval. Fillet is covered with the capillary and porous structure which sight is optimized experimentally. It is considered heat-sink ability of a nozzle. Thermal tension is calculated in fillet its geometrical characteristics also are defined. Heat-accumulating ability of nozzle is considered. Thermal tensions in fillet are calculated and their geometrical characteristics are also defined.

Аңдатпа

Оптика-поляризациялық әдіспен алынған жырашық үшін кернеу интерферограммасының шифры ашылды. Жырашықты құрастыру қағидаттарды тұрғызылды. Энергоқондырғының қақпақ маны галтель түріндегі кернеу шоғырландырғышы зерттелді. Галтель Лавальдың дыбыстан жылдам қақпағының диффузорлық бөлігінің көтерілу үлгісінде доға тәрізді жасалды. Гальтель түрі тәжірибелі оңтайландырылған капиллярлы-кеуек құрылыммен қапталған. Қақпақтың жылушоғырландырғыш қасиеті ескерілді. Галтелдің ішіндегі жылу кернеулері есептелді және де оның геометриялық сипаттамасы анықталды.

Введение

Концентраторы напряжений, которые присущи паровым и газовым турбинам на электростанциях, являются источниками аварий и иногда несчастных случаев персонала. К ним относятся шероховатость, резкие изменения формы или размеров, недостаточные радиусы закруглений, либо действие коррозии.

Концентраторы напряжений являются причиной возникновения и развития усталостных трещин в турбинах электростанций, а также статического разрушения деталей из хрупких материалов. В настоящее время эффективны исследования концентраторов напряжений в пространстве. Для этого полезен способ голографической интерферометрии, позволяющий проводить исследования методом деформаций

Тема диссертационной работы: «Исследование концентраторов напряжений в турбинах электростанций».

Цель: Исследовать концентраторы напряжений в роторах и статорах турбин путем физического моделирования канавок с помощью оптико-поляризационного метода (метода фотоупругости).

Основные задачи:

Разработать модель канавчатого концентратора турбины (термокомпенсационной канавки) в масштабе 10:1;

Получить интерферограммы напряжений для турбинной канавки с помощью оптико-поляризационного метода;

Расшифровать интерферограммы напряжений для сжатия и растяжения;

Разработать принципы конструирования турбинных канавок с целью увеличения маневренности турбины;

Дать оценку величинам напряжений и критическим размерам усталостных трещин.

Теоретическая работа:

Обзор работы по концентраторам напряжений в турбинах электростанций;

Разработка модели канавки в масштабе 10:1;

Изучение метода фотоупругости для исследования напряжений в канавках турбин;

Расшифровка интерферограмм напряжений сжатия и растяжения в турбинной установке;

Разработка принципов конструирования турбинных канавок, оценка величин напряжений и критических трещин.

Экспериментальная работа:

Создать модель в масштабе 10:1 турбинной канавки;

Получить интерферограммы напряжений для модели турбинной канавки методом фотоупругости.

1 Обзор работ по концентраторам напряжений

1.1 Образование концентраторов напряжений в турбинах электростанций

Трещины в роторах и валах турбин могут образовываться не только на внутренней расточке, но и на поверхности вследствие усталости или малоцикловой (термической) усталости.

При вращении колеблющего вала в нем возникают изгибные напряжения, достигающие максимальных значений на его поверхности. Особенно значительны они в местах концентрации напряжений, т.е. в местах резких изменений диаметров сечений, тепловых и шпоночных канавок и т.д. Размеры ротора выбираются, главным образом, так, чтобы обеспечить требуемую критическую частоту вращения. При этом возникающие изгибные напряжения оказываются сравнительно малыми, и появление трещин усталости может произойти в области концентраторов.

Выше отмечалось, что высокие температурные напряжения в сочетании с напряжениями от центробежных сил могут привести к недопустимому возрастанию напряжений на расточке ротора и его внезапному хрупкому разрушению. Однако при пуске еще большие температурные напряжения возникают в роторе на его поверхности, которая имеет непосредственный контакт с паром. Эти напряжения многократно усиливаются концентрацией напряжения. Даже при умеренных скоростях пуска турбин в местах концентрации возникают столь значительные напряжения, что происходит пластическое течение материала. Это приводит к тому, что при выходе агрегата на стационарный режим в роторе появляются остаточные напряжения, которые релаксируют накопление повреждений в материале за счет ползучести. При многократном повторении таких пусковых напряжений в роторе возникают трещины малоцикловой (термической) усталости.

В последние годы на французских турбинах мощностью 125 МВт было два случая появления трещин усталости в цельнокованных роторах ЦНД в переходе от последнего диска к шейке вала, на которой размещено концевое уплотнение (рис.1.1). Постепенное развитие и ступенчатый характер трещин ясно свидетельствовали об их усталостном происхождении. По-видимому, значительную роль в появлении и развитии трещин сыграли образующиеся в них концентрированные солевые растворы, сильно снижающие сопротивление материала усталости.

В обоих случаях вследствие образования трещин наблюдалось возрастание уровня вибрации примыкающего подшипника.

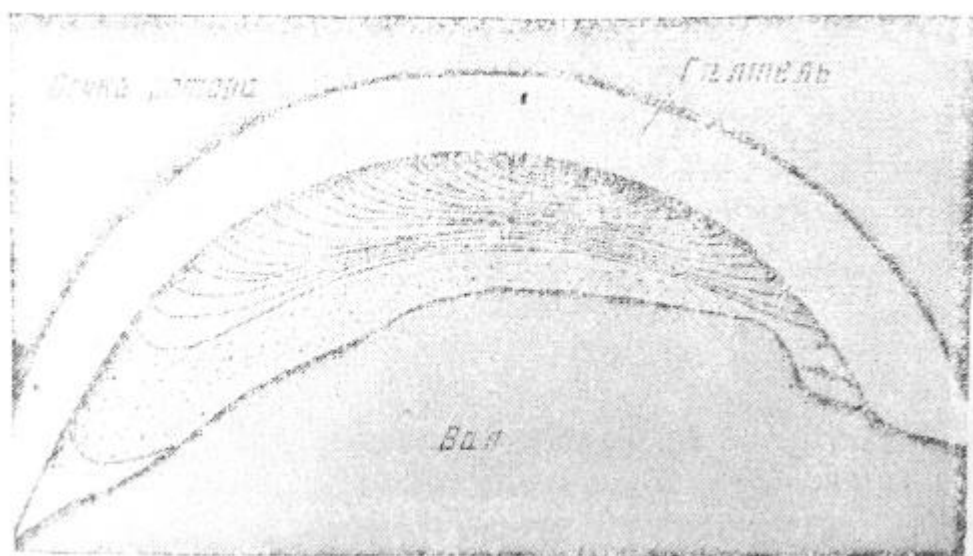


Рис. 1.1 Трещина усталости в галтелях ротора ЦНД французской турбины мощностью 125 МВт после 90 тыс. часов работы

Трещины термической усталости обычно возникают в тех местах турбины (рис. 1.2), где температура изменяется наиболее значительно, где она достигает максимальных значений и имеются резкие переходы, надрезы, галтели и т.д. Как правило, это область первой ступени ЦВД и ЦСД, и зона уплотнений первой диафрагмы или ближайшего отсека концевого уплотнения. Особую опасность представляют собой тепловые (компенсационные) канавки. В этих местах напряжения могут в 5-6 раз превышать так называемые номинальные напряжения (в предположении отсутствия тепловых канавок).

Другим слабым местом является галтель между диском первой ступени и валом (рис. 1.2), которая подвергается тщательной профилировке для уменьшения концентрации температурных напряжений.

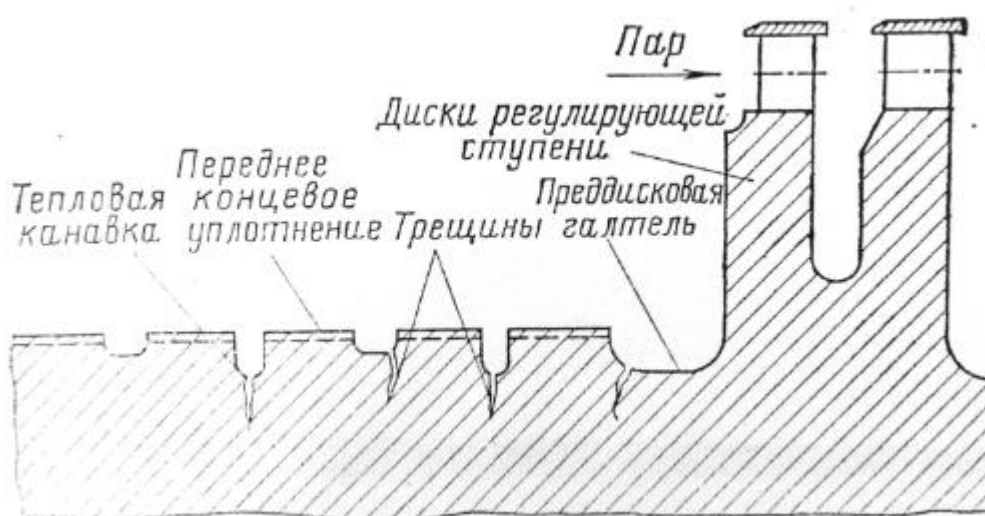


Рис.1.2 Места возникновения трещин термической усталости в роторах американских турбин

В настоящее время считается общепринятым, что температурные напряжения в роторах ЦВД и ЦСД – самый главный фактор, ограничивающий скорость пуска и нагружения турбины.[1]

Одна из наиболее тяжелых аварий на электростанции является разрушение дисков, так как она способствует полному разрушению турбины, а в некоторых случаях и наносит некоторый урон соседнему оборудованию

К разрушению дисков в основном приводит разгон машины при отказе систем регулирования и защиты. Потому что диски, так же как и рабочие лопатки, являются очень напряженными деталями. Поэтому содержание в идеальном состоянии систем регулирования и защиты является непременным условием исключения разгона турбины при резком сбросе нагрузки и отключении генератора от сети.

К разрыву диска могут привести и некачественный металл, из которого он изготовлен, или неправильная его обработка. Следует подчеркнуть, что изготовление качественных поковок дисков в соответствии с теми высокими требованиями, которые к ним предъявляются, является сложной технологической задачей.

В процессе изготовления диски проходят тщательный технологический контроль, а изготовленный ротор в специальной вакуумной камере разгоняется до рабочей частоты вращения при балансировке. Поэтому разрывы дисков – авария крайне редкая.

Основной причиной разрыва дисков в условиях эксплуатации являются трещины, появляющиеся в результате усталости или коррозии.

Также не стоит забывать о коррозии. Последствия коррозии особенно тяжелы в тех случаях, когда она происходит в зоне высоких напряжений.[1]

Также немаловажным фактором является вибрация дисков. Вибрация дисков и связанные с ней разрушения происходят под действием периодических импульсов со стороны парового потока. Природа возникающих внешних импульсов не отличается от импульсов, вызывающих вибрацию рабочих лопаток.

Подобно тому, как рабочие лопатки имеют различные тона колебаний, характеризующиеся соответствующими значениями собственных частот и форм колебаний, диски турбин также имеют бесчисленное число собственных частот и форм колебаний. Из них наиболее значение имеют две формы колебаний: зонтичные и веерные.

При зонтичных колебаниях все точки диска перемещаются во времени, за исключением точек, геометрическое место которых представляют собой окружности. В простейшем случае такой окружностью может быть окружность примыкания полотна диска к ступице.

В паровых турбинах практически отсутствуют условия для возникновения резонансных зонтичных колебаний, поэтому они не играют собственной роли.

Гораздо большее значение имеют веерные колебания, при которых неподвижными (узловыми) являются диаметры, а соседние области колеблются в разных зонах. Опасными для турбинных дисков являются веерные колебания с числом узловых диаметров от двух до шести.

Так же как и при вибрации рабочих лопаток, вибрация рабочих дисков опасна только тогда, когда наблюдается резонанс, т.е. совпадение частоты собственных колебаний вращающегося диска с частотой возмущающей силы, и когда возмущающие силы достаточны велики.

Опасным вибрациям подвержены только тонкие диски, частота собственных колебаний которых мала. Для исключения возможности резонанса диск «настаивают», снимая с его боковых поверхностей часть металла (без снижения его сопротивления к разрыву) для изменения частоты собственных колебаний.

Для толстых дисков, в частности для дисков последних ступеней, размеры ступиц и обода велики, а внешний диаметр мал, поэтому такие диски имеют весьма высокую частоту собственных колебаний и опасности резонанса для диска не возникает. Правда, учет осевых смещений диска при веерных колебаниях приходится все равно производить, поскольку они значительно сказываются на вибрационных характеристиках не диска, а рабочих лопаток.

Вследствие вибрации в материале диска проявляется явление усталости металла, ведущее к появлению трещины усталости (рис 3). Как обычно, трещины возникают в местах концентрации напряжений: разгрузочных отверстиях, галтелях, царапинах и рисках.

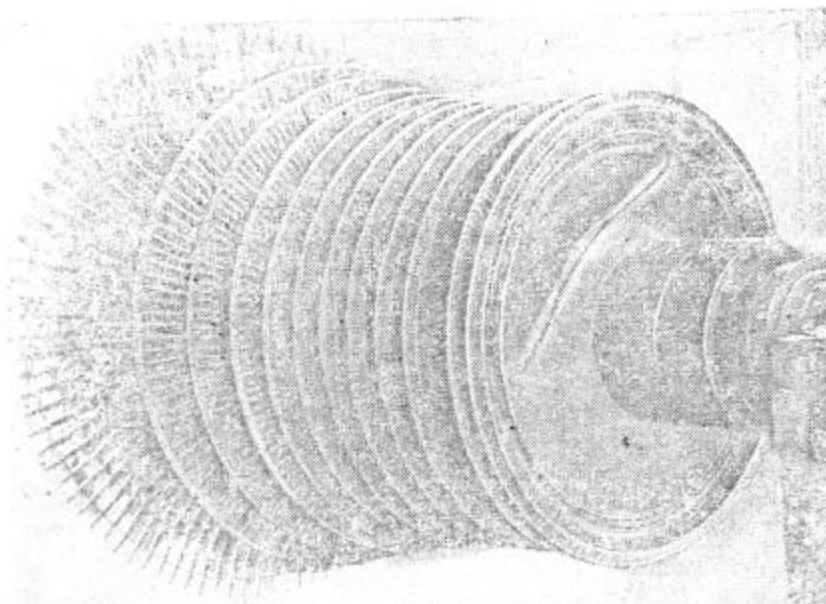
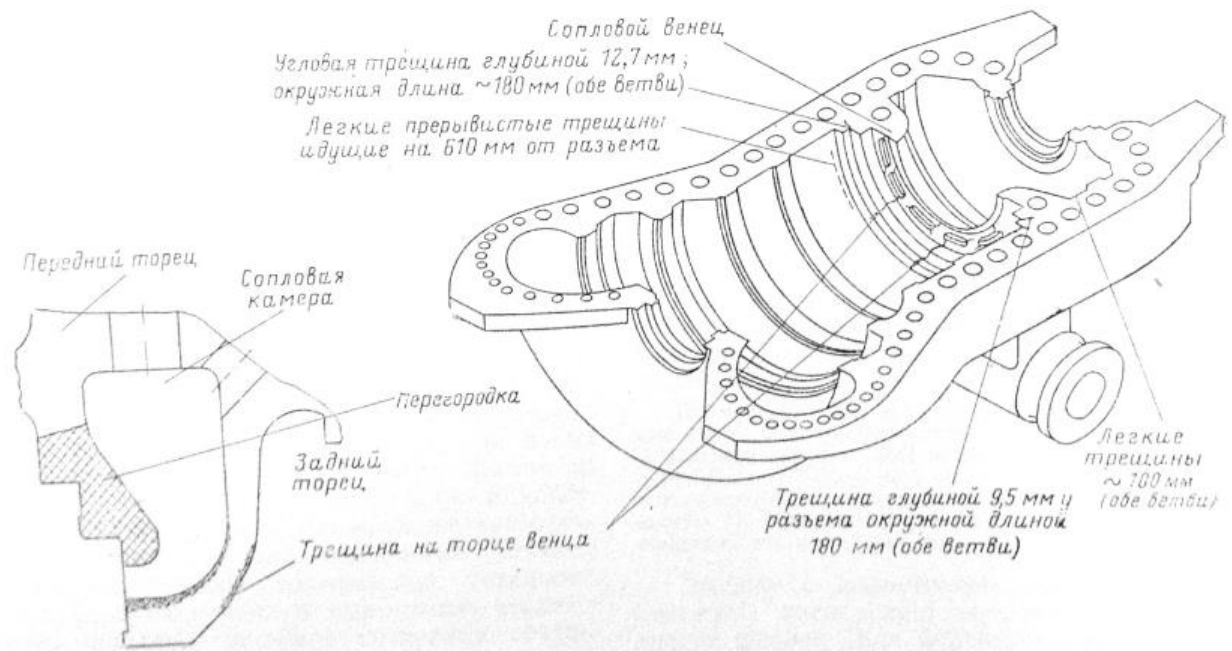


Рис. 1.3 Трещина усталости в диске регулирующей ступени

Особенно опасным местом диска является его обод, на котором крепятся лопатки. Форма обода сложна, лопаточный паз имеет скругления малого радиуса, в которых действуют повышенные напряжения. Эти напряжения еще более увеличиваются при не плотной установке лопатки в

диске, когда на диск начинают действовать наряду с центробежной силой лопатки и переменные напряжения от ее колебания.



На рис. 1.4 показаны места и характер образования трещин в паровпускной части другой американской турбины, проработавшей 7 лет и пускавшейся 1124 раза, в основном после остановки на ночь[1].

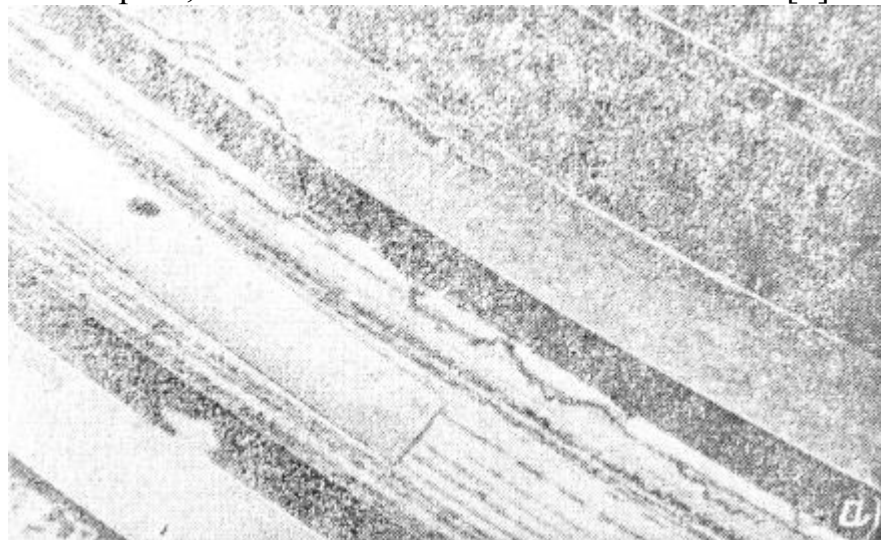


Рис. 1.5 Типичное расположение трещин в верхней части корпуса турбины мощностью 66 МВт на начальные параметры пара 6 МПа и 480°С, работающей в режиме частых пусков

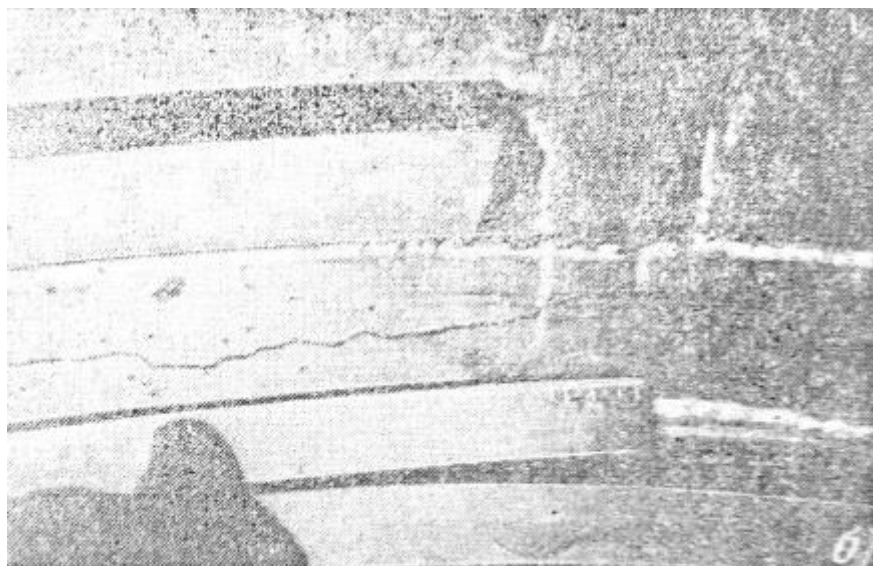


Рис 1.6. Вид трещин термической усталости на внутренней поверхности корпуса ЦВД (а – нижняя половина корпуса, б – верхняя половина корпуса)

1.2 Мероприятия проводимые при ремонте оборудования

После очистки ротор должен быть тщательно осмотрен лупой, особенно в тех конструктивных местах, которые могут явиться концентраторами напряжений. Концентрация напряжений обычно возникает в кольцевых выточках, галтелях, переходах сечений от одного диаметра ротора к другому, в шпоночных канавках, отверстиях, резьбовых соединениях, на кромках без достаточных радиусов закругления, а также в деталях при их горячей посадке с завышенными натягами, вызывающими большие удельные давления. Дефекты, которые возникают в процессе эксплуатации и ремонта, как: насечки, риски, пробоины являются концентраторами напряжений. Причиной по которой могут образоваться такие дефекты, является грубая обработка и повреждения поверхностей (удары), износ от попадания твердых частиц, паразитные токи, эрозия, коррозия, вибрация и пр.

При ремонте, в случае необходимости производить обработку поверхностей вала и его деталей, должны быть приняты меры для уменьшения отрицательного влияния указанных причин на надежность дальнейшей эксплуатации.

Обработка рабочих поверхностей для горячей посадки деталей на вал (диски, втулки, центрирующие кольца и др.) должна производиться с частотой, соответствующей 6-8-му классу. Чистота поверхности значительно повышает длительную прочность и коррозионную стойкость, поэтому после указанной обработки следует производить полировку мест горячей посадки до полного удаления следов резца. Натяг горячей посадки должен быть рассчитан на сохранение плотной посадки при пуске турбины, когда диски прогреваются быстрее вала, при числе оборотов, когда обрабатывает предохранительный выключатель, и при других

режимах эксплуатации; ослабление посадки между сопрягаемыми деталями можно привести к наклепам, контактной коррозии и опасным напряжениям, связанным с вибрацией.

Галтели, углы, кромки и другие переходные места должны быть обработаны с достаточными радиусами закруглений, с последующей шлифовкой указанных мест. Сверловка отверстий, нарезка резьбы, обработка и устройство новых шпоночных канавок, кольцевых выточек и других углублений могут быть допущены только в случаях особой нужды, с обеспечением необходимой прочности деталей и с принятием мер для устранения очагов концентрации напряжений.

Оставление трещин во вращающихся деталях при таких условиях не может быть допущено; расчистка трещин должна производиться до полного их удаления, с закруглением краев образующейся канавки; если обработка трещины приведет к недопустимому ослаблению детали, последняя должна быть забракована, а в отношении ремонта вала вопрос должен решаться после консультации с заводом-изготовителем или другой компетентной организацией.

Повреждение вала в виде царапин, задиров. Рисок (особенно опасны глубокие, идущие вдоль шейки), а также коррозионные повреждения (ржавление) и шероховатости рабочих поверхностей устраняются в зависимости от величины дефекта и его направления проточкой с последующей шлифовкой или только шлифовкой.[2]

Конструктивные формы и размеры рабочих и направляющих лопаток, а также способы их крепления на роторах и в цилиндрах отличаются большим разнообразием, зависящим от тех сложных и тяжелых условий, в которых приходится работать лопаточному аппарату. Эти условия в основном связаны со следующими причинами:

1. Действие центробежных сил, вызывающих в хвостовых и профильных частях рабочих лопаток значительные растягивающие напряжения, в при расположении центров тяжести различных сечений лопаток не на радиальной линии – и изгибающие напряжения; последние в местах закрепления лопаток вызываются и действие на лопатки паровых усилий от давления проходящего пара. Величина растягивающих напряжений не зависит от нагрузки турбины и изменяется только в зависимости от изменения массы лопаток и их окружной скорости (при данном числе оборотов является величиной постоянной); величина изгибающихся напряжений зависит от нагрузки турбины (от расхода пара), теплового перепада на ступень, окружной скорости, от числа лопаток на диске и др. Особенно большие напряжения от центробежных сил и паровых изгибов, достигающие нескольких тонн, развиваются на рабочих лопатках последней ступени турбины, что вызывается их большой длиной, массой и наибольшим средним диаметром; если величина рабочих напряжений в лопатках первых ступеней лежит в пределах $2,5-8 \text{ кг/мм}^2$, то напряжения на лопатках последних ступеней достигают $15-20 \text{ кг/мм}^2$.

2. Действием пара, состояние которого меняется от перегретого на лопатках большей части ступеней турбины до влажного на лопатках последних ступеней. Длительное воздействие высоких температур, близких к температуре свежего пара, вызывает снижение механических свойств, появление ползучести металла лопаток и требует применения жаропрочных и жаростойких сталей. Работа лопаток ступеней низкого давления в среде движущегося влажного пара приводит к эрозии и к поверхностным разрушениям металла лопаток.

3. Действие вибраций, вызываемых периодическим воздействием на рабочие лопатки возмущающихся сил; эти силы возникают под влиянием неудовлетворительной динамической балансировке роторов, неравномерности проходных сечений каналов диафрагм, отклонений в шаге от рабочих лопаток, местных неправильностей пригонки диафрагмы в горизонтальных разъемах двух половин, неточности установки и разной толщины, а также сработки выходных кромок направляющих лопаток, парциальности подвода пара и др.

Причинами вибрации лопаток могут быть также неудовлетворительные условия эксплуатации; например, при изменении частоты в сети изменяется число оборотов турбоагрегата, работающего на эту сеть, и ухудшаются вибрационные характеристики облопачивания; величина амплитуд вибрации в этих случаях может возрасти и отдельные ступени лопаток попасть в резонанс, так как настройка лопаток обычно производится с учетом допустимости снижения частоты в сети не ниже 49,5 пер/сек и повышения – не выше 50,5 пер/сек. Изменение частоты больше указанных пределов недопустимо, так как накопление даже непродолжительных промежутков времени работы с повышенной частотой может приводить через определенное время к поломкам лопаток при напряжениях значительно меньших предела текучести их материала.

Различные дефекты на поверхности лопаток в виде рисок, царапин, шероховатостей и плохой полировки, а также выточки, резкие переходы сечений, надрезы и наклеп в местах расклепки в местах расклепки бандажа являются очагами местных напряжений, способствующих разрушению лопаток. Чаще всего в зонах концентрации напряжения при определенных условиях начинается и развивается разрушение рабочих лопаток, дисков и других деталей турбины. Во время ремонта необходимо прежде всего установить состояние лопаточного аппарата турбины.

Перед выемкой ротора необходимо произвести проверку осевых (аксиальных) и радиальных зазоров в рабочих и направляющих лопатках.

Осевыми зазорами называются зазоры между подвижными и неподвижными частями турбин (между рабочими и направляющими лопатками, между гребнями лабиринтных уплотнений на роторе и статоре и т.д.), изменяющиеся по величине при передвижении ротора вдоль оси турбины. Радиальными называются зазоры между подвижными и неподвижными частями турбины, которые расположены на радиусах, т.е. в плоскостях, перпендикулярных продольной оси турбины. От состояния

зазоров в проточной части в значительной степени зависят надежность и экономичность турбины.[2]

1.3 Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела.

Сравнительно недавно область применения поляризационно-оптических средств определения напряжений и деформаций ограничивалась линейными упругими задачами. Между тем в последние годы были развиты и другие поляризационно-оптические методы, которые позволяют эффективно изучать значительно более широкий класс задач механики деформируемых тел – нелинейные задачи теорий упругости, пластичности и ползучести. Эти методы основываются как на классической схеме, при которой исследования выполняются на прозрачных моделях (нелинейная фотоупругость, фотопластичность, фотоползучесть), так и на использовании фотоупругих покрытий, наносимых на натуральные конструкции или на модели из натуральных конструкционных материалов.

В основе поляризационно-оптических методов исследования напряжений и деформаций лежит явление искусственного двойного лучепреломления, связанное с тем, что прозрачные материалы под воздействием напряжений приобретают оптическую анизотропию.

Степень этой анизотропии зависит от напряженного и деформированного состояния материала и характеризуется тензором диэлектрической проницаемости. Оптические величины, связанные с этим тензором, могут быть определены при помощи несложных поляризационных устройств. Для этого через прозрачную модель – чаще всего напряженную пластинку – пропускается пучок поляризованного света. При этом на экране установки возникает интерференционная картина, характеризующая напряженно-деформированное состояние модели.

По интерференционной картине непосредственно определяются не все компоненты напряжений, а (чаще всего) только направления главных нормальных напряжений и их разности.

Для исследования неупругих задач широко используется метод фотоупругих покрытий. Сущность этого метода состоит в том, что на поверхность конструкции или ее модели, изготовленной из материала природы, наносятся сравнительно тонкие покрытия из прозрачных материалов. Покрытия деформируются вместе с поверхностью, на которую они нанесены. При помощи поляризационно-оптических установок для работы в отраженном свете измеряются оптические эффекты в покрытиях и по ним определяются деформации и напряжения в исследуемых объектах.

В настоящее время метод фотоупругих покрытий позволяет исследовать неупругие задачи как при малых, так и при больших деформаций. С его помощью эффективно исследуются натуральные конструкции, пластинки и оболочки с вырезами и подкреплениями, остаточные напряжения в телах

сложной формы, микрообъекты типа зерен металла, трещины, развивающиеся в процессе разрушения, технологические задачи.[3]

1.4 Приборы для исследований в проходящем свете

Простейшим полярископом могут служить две поляроидные пленки со скрещенными плоскостями пропускания. Между этими пленками помещается модель, а для просвечивания используется любой источник света, в том числе и дневной свет. Однако, такая установка пригодна лишь для качественного наблюдения интерференционной картины.

Большинство поляризационно-оптических установок состоит из поляризаторной и анализаторной частей, между которыми устанавливается нагружающее устройство с моделью.

Поляризационная часть установки включает в себя источник света, теплофильтр, задерживающий тепловую часть излучения, светофильтр, поляризатор и систему линз для получения параллельного пучка света, которым освещается модель. В последнее время начинают широко использоваться полярископы с источником рассеяного света (например, набор ламп, расположенных за матовым стеклом).

Источники света должны обладать достаточной мощностью и вместе со светофильтром давать монохроматический свет с определенной длиной волны (или несколькими длинами волн), а также белый свет. Наибольшее применение в поляризационно-оптических установках получили ртутные лампы высокого давления с зеленым светофильтром (длина волны $\lambda \approx 546$ мкм). В качестве источника белого света используются кинопроекторные лампы накаливания или та же ртутная лампа без светофильтра.

В поляризационно-оптическом методе все шире используются в качестве источников света оптические квантовые генераторы, излучающие свет высокой интенсивности и монохроматичности. Весьма высокая степень когерентности лазерного пучка света позволяет успешно применять лазеры для различных интерферометрических измерений, при этом требования к качеству оптических систем могут быть существенно ослаблены, а их схемы упрощены. Степень поляризации излучения лазеров достигает 100%.

Не касаясь теории работы лазеров, опишем кратко устройство лазера, опишем кратко устройство лазера, схематически изображенного на рис. 1.7 Между зеркалами 1 и 2, одно из которых изготавливается полупрозрачным, имеется активная среда 3, например смесь неона с гелием (газовый лазер), или кристалл рубина (рубиновый лазер). Газовые лазеры работают в постоянном режиме, рубиновые – в импульсном. Для работы лазера активная среда возбуждается до соответствующего состояния за счет высокочастотного источника энергии 4; благодаря этому возникает так называемое индуцированное излучение, отличительной особенностью которого являются отмеченные выше свойства.

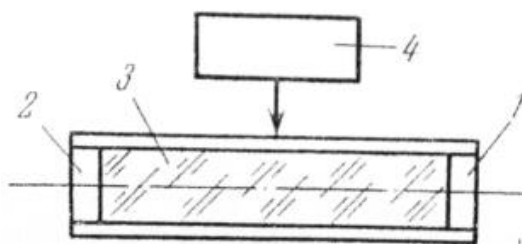


Рис. 1.7 Схема газового лазера: 1,2 – зеркала, 3 – активная среда, 4 – возбуждатель.

Поляризующие элементы – поляризаторы желательно устанавливать после системы линз непосредственно перед моделью с тем, чтобы возможные остаточные напряжения в линзах не сказывались на точности поляризационно-оптических измерений. В настоящее время освоен промышленный выпуск пленочных поляриодов большого формата и выполнение этого требования не вызывает затруднений. Поляризатор и анализатор монтируются в круглых поворотных оправках, снабженных лимбами. Цена деления лимба соответствует чувствительности глаза или фотоэлемента к изменению интенсивности света при повороте лимбов и колеблется в пределах $0,5 \div 2^\circ$.

Точность установки плоскостей поляризации может быть повышена применением полутеневого метода. В этом случае анализатор склеивается из двух частей, оси пропускания которых составляют небольшой угол 2α (Рис. 1.8 а). Если ось I-I установлена перпендикулярно плоскости пропускания поляризатора П-П, то в окуляре прибора левая половина поля будет затемненной, а правая – светлой (рис. 1.8 б). Случай, когда ось П-П перпендикулярна оси П-П, показан на рис. 1.8 г. Если ось А-А установить перпендикулярно оси П-П, то обе половины поля окуляра окажутся одинаково затемненными (рис. 1.8 в). Это положение глаз может фиксировать с высокой точностью, достигающей до сотых долей градуса при однородном поле модели.

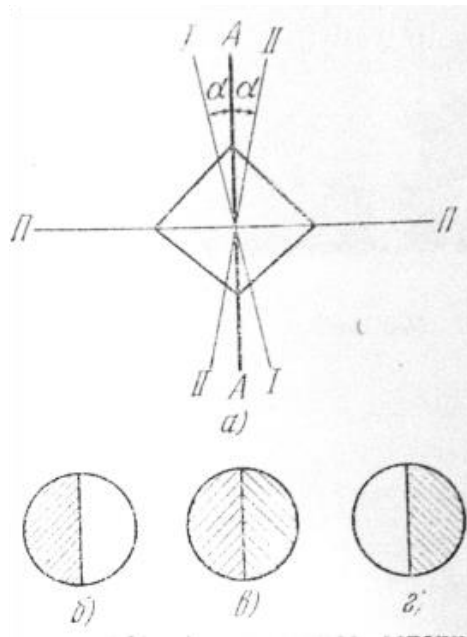


Рис. 1.8 а поперечное сечение призмы Николя. Оси I-I и II-II лежат в плоскостях пропускания левой и правой призмы. б, в, г – поле в окуляре.

Анализаторная часть установки включает в себя анализатор, который также желательно располагать сразу же после модели, систему линз, экран или фотоаппарат. Обычно анализаторная и поляризаторная части установки собираются на отдельных оптических скамьях, что облегчает установку и загрузку модели, однако затрудняет юстировку прибора.

Приборы для исследования методом полос имеют большее поле и снабжаются устройствами для фотографирования или зарисовки картин полос и изоклин. Оптические схемы нескольких таких установок приведены на рис. 1.9-1.11, а общий вид их показан на рис. 1.12-1.13.

Выпускаются установки со сменными источниками монохроматического света для получения дополнительных картин.

В этом случае осветитель выполняется в виде револьверной головки, поворотом которой устанавливается нужный источник света. В качестве поляризующих приборов используется в основном поляроидная пленка. Синхронное вращение поляризатора с анализатором обеспечивается сельсинами.

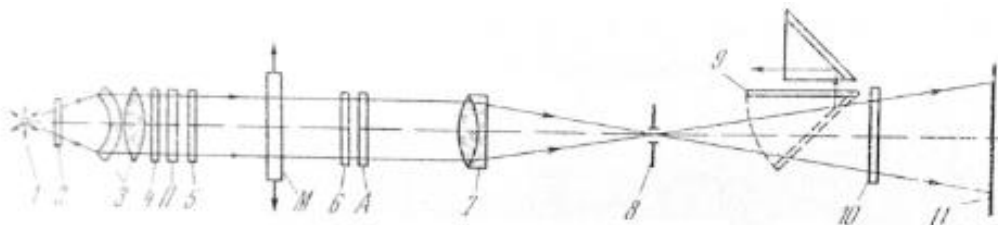


Рис.1.9 Схема установки ИМАШ-КБ-2: 1- источник света (сменный: ртутная лампа и лампа, накаливания), 2 - теплофильтр, 3 - конденсатор, 4 – светофильтр($\lambda=546$ мкм), П – поляризатор (поляроид), 5,6 – пластинки в $\lambda/4$ (откидные поворотные), М – модель, А – анализатор (поляроид), 7 –

объектив, 8 – диффрагма, 9 – откидное зеркало, 10 – фотопластинка, П – экран. Диаметр рабочего поля 130 мм, увеличение изображения $1 \div 5$.

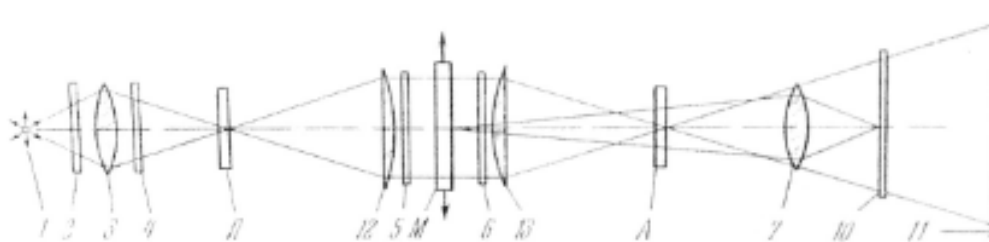


Рис. 1.10 Схема установки ППУ-7: 1 – источник света (сменный: ртутная, кадмиевая лампа и лампа накаливания, выделяемый свет $\lambda=436, 546, 578, 644$ мкм), 12,13 – линзы, остальные обозначения тае же, что и на рис.1.9. Установка оборудования сменными светофильтрами, сельсинами для поворота плоскостей поляризатора и анализатора. Диаметр рабочего поля 120 мм, увеличение $\frac{1}{5} \div 5$.

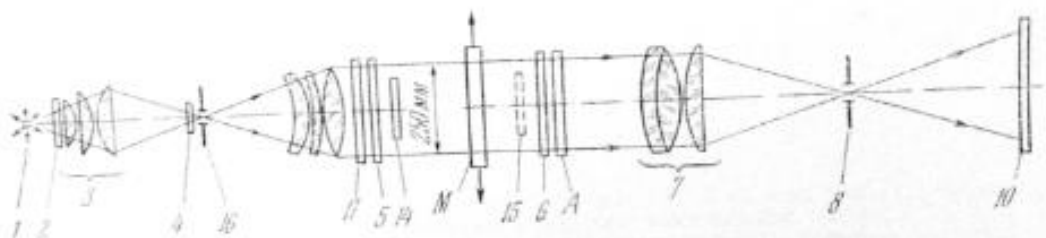


Рис. 1.11 Схема установки БПУ-ИМАШ-ЦКБ-ЦАС. Обозначения те же, что и на рис. 1.9, 14-15 – съемные светочувствительные пластинки, 16 – ирисовая диафрагма. Источник света сменный (ртутная лампа, кинопроекционная и спектральная лампа), выделяется свет с длинами волн $\lambda=436, 546, 644$ мкм. Диаметр рабочего поля 250 м.

Установка для исследований методом рассеяного света состоит из поляризаторной части, снабженной оптическими устройствами для получения узкого пучка поляризованного света, и фотоаппарата. Принципиальная схема такой установки типа ИМАШ-УРС

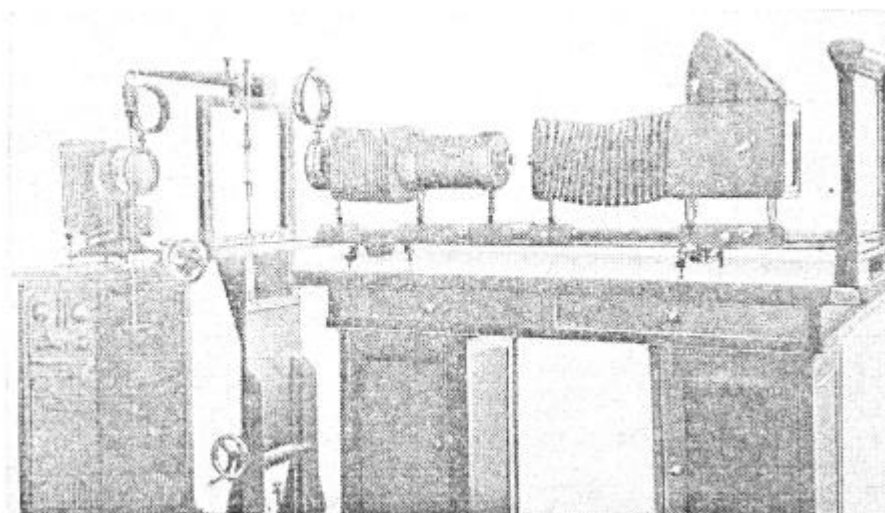


Рис. 1.12 Общий вид установки ИМАШ-КБ-2

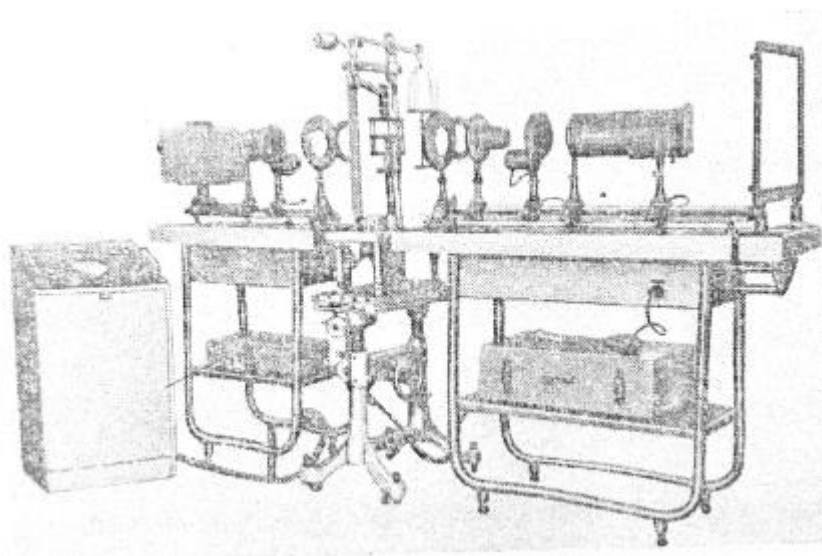


Рис.1.13 Общий вид установки ППУ-7.

показана на рис. 1.14. Здесь свет от источника света 1 проходит через теплофильтр 2, систему линз 3, светофильтр 4, поляризатор П и в виде круглого плоско-поляризованного пучка падает на щель 18. Из этой щели свет выходит в виде плоского пучка параллельных лучей, который пропускается через модель М, помещенную в иммерсионную ванну 19. Картина полос в рассеянном свете фиксируется устройством для фотографирования. При использовании второго варианта схемы рассеянного света необходимо поместить анализатор между моделью и устройством для фотографирования, исключив из схемы поляризатор П.

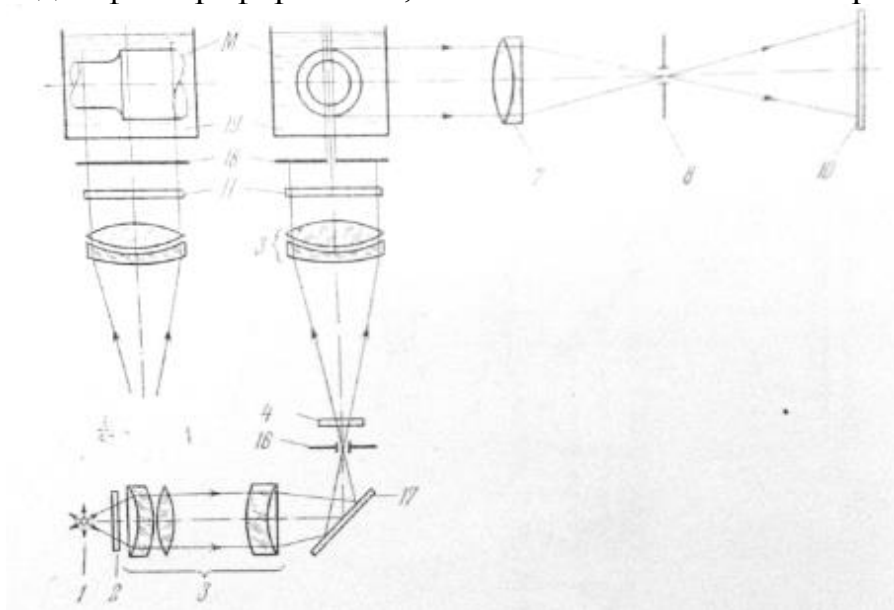


Рис. 1.14 Схема установки ИМАШ-УРС. Обозначения те же, что и на рис. 2.3, 16- ирисовая диафрагма, 17 – зеркало, 18 – щелевая диафрагма, 19 – иммерсионная ванна.

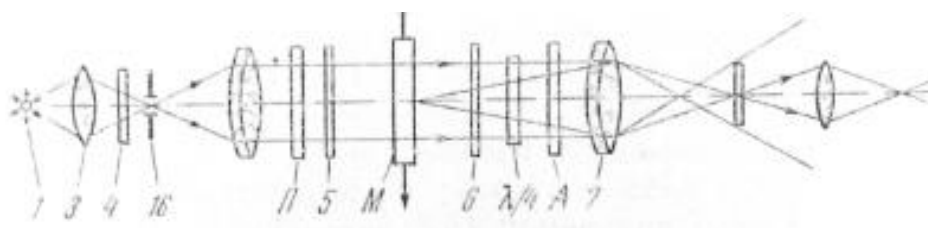


Рис. 1.15 Схема прибора КСП-7. Обозначения те же, что и на рис. 1.9. Источник света сменный, имеются фазовые пластинки в $\lambda/4$ для компенсации методом Сенармона, прибор устанавливается на координатнике, оборудован пультом управления, наибольший диаметр рабочего поля 22 мм, модель рассматривается при увеличении $6 \div 24$.

Координатно-синхронные поляриметры предназначены в основном для измерения методом компенсации по точкам. Схема и общий вид такого поляриметра типа КСП-7 приведены на рис. 1.15 и 1.16. Оптическая часть установки монтируется на координатном устройстве, позволяющем перемещать ее по вертикали и горизонтали в плоскости, перпендикулярной оптической оси установки, и таким образом устанавливать против требуемой точки модели.



Рис. 1.16 Координатно-синхронный поляриметр КСП-7. Общий вид

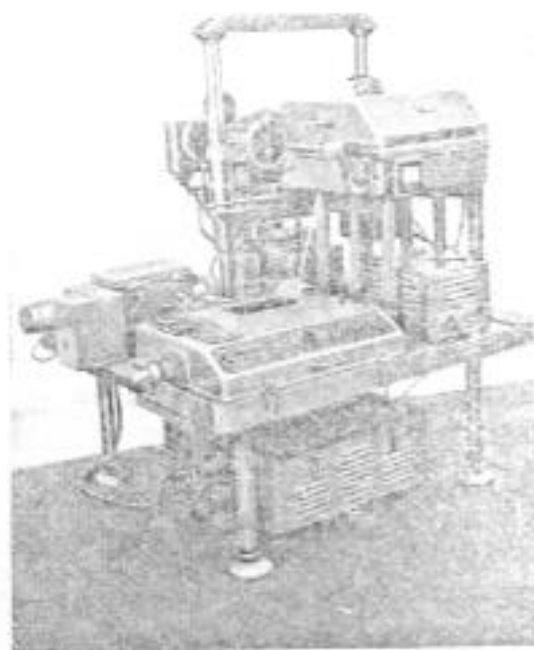


Рис. 1.17 Общий вид автоматического поляриметра ИПЛ-451.

На рис. 1.17 представлен один из экземпляров автоматических поляриметров с полной автоматизацией компенсационных измерений по точкам.

2.3 Об исследовании простейших задач

Наиболее просто и эффективно исследуются поляризационно-оптическим методом задачи определения концентрации напряжений у свободных границ тела в районе геометрических особенностей типа отверстий и вырезов. Использование обычных тензометрических методов измерения деформаций в местах концентрации напряжений, где имеют место высокие градиенты деформаций на базе измерения. Получаемые при этом средние деформации могут значительно отличаться от их локальных значений. Поляризационно-оптические измерения при нормальном просвечивании плоско-напряженных моделей выполняются на практически нулевой базе, чем и определяется их высокая эффективность и точность при исследовании концентрации напряжений.

Иногда для характеристики концентрации напряжений достаточно получить лишь коэффициент концентрации напряжений, представляющий отношение наибольшего (пикового) напряжения в зоне концентратора к величине соответствующего номинального напряжения, которое возникло бы в этой точке при отсутствии концентратора. Определение коэффициента концентрации напряжений в плоских моделях часто упрощается тем, что пиковые напряжения обычно возникают в точках, лежащих на участках свободного контура, где имеет место одноосное напряженное состояние. Измеряемая здесь оптическая разность хода пропорциональна действующему в этих точках параллельно контуру главному напряжению.

Таким образом, в рассматриваемых здесь задачах исследования концентрации напряжений интересующие нас величины получаются непосредственно из оптических картин без отыскания отдельных значений компонент напряжений. Такие задачи в поляризационно-оптическом методе называют простейшими.

Для правильного определения порядка полосы на контуре концентратора требуется тщательная постановка эксперимента. Высокие требования должны предъявляться к чистоте обработки модели в зоне концентратора; боковая поверхность модели должна быть лишена «завалов» и строго перпендикулярна ее лицевой поверхности. Световой пучок в поляризационно-оптической установке должен быть строго параллельным, а плоскость модели – выставленной по нормали к этому пучку. Контур модели на экране установки должен быть виден в виде тонкой четкой линии. При несоблюдении этих условий оптическая картина у контура модели на экране установки будет искажена, найденный здесь порядок полосы может оказаться при наличии высоких градиентов заметно ниже пикового. Отметим также, что аналогичные искажения могут

возникнуть в зоне концентраторов при искривлении поверхностей модели под нагрузкой и при наличии больших градиентов в оптической разности хода.[3]

2 Исследование концентраторов напряжений в турбинах электростанций

Концентраторы напряжений на теле ротора и статора турбины приводят к трещинам в результате малоциклового термической усталости материала. Примерами концентраторов напряжений являются: термокомпенсационные канавки в области лабиринтных уплотнений, которые вытачивают на валу, чтобы предохранить ротор от прогиба в случае задеваний в уплотнениях, при этом выделяется теплота, которая локализуется на узком участке и деформация не выходит за пределы участка вала, ограниченного двумя канавками; придисковые галтели; выточки на валу под уплотнениями.

Значительную роль в появлении и развитии трещин играют образующиеся в них концентрированные солевые растворы, сильно снижающие сопротивление материала усталости. Вследствие образования трещин наблюдается возрастание уровня вибрации подшипника.

В местах концентраторов напряжений последние в 5-6 раз превышают напряжения, возникающие на поверхности ротора при отсутствии канавки. Поэтому температурные напряжения в роторах являются самым главным фактором, ограничивающим скорость пуска и нагружения турбины [1,2].

Для изучения термоупругих напряжений в канавках, имитирующих концентраторы напряжений ротора турбины, использовался метод физического моделирования с помощью поляризационно-оптической системы (метода фотоупругости) [3]. С помощью интерференционных картин наблюдались процессы развития термонапряжений в моделях из оптически чувствительных материалов.

Ранее метод фотоупругости оказался весьма эффективным при исследовании термонапряжений в различных горных породах [4] и в пористых образцах высокофорсированных систем охлаждения теплоэнергетического оборудования [5].

В моделях канавок осуществлялся нагрев электрическим током, причем модели позволяли отразить подобную физическую суть процессов, протекающих в натуральных канавках. Для этого в заданный момент времени обеспечивалось подобие температурных полей модели и природы.

Для разделения главных направлений в исследуемых моделях использовался способ анализа трех картин изохром [3], которые получались при просвечивании поляризационным светом модели в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Численное разделение главных нормальных напряжений производилось решением уравнений изохром для каждой исследуемой точки:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n_1 \lambda / c d_1; \sigma_2 - \sigma_3 = n_2 \lambda / c d_2; \sigma_3 - \sigma_1 = n_3 \lambda / c d_3, \quad (2.1)$$

где c – оптический коэффициент напряжений материала клеенки; n_1, n_2, n_3 – порядок полос в исследуемой точке для трех взаимно перпендикулярных сечений; $d_1=d_2=d_3= d$, λ – толщина материала и теплопроводность материала клеенки из оптически чувствительного материала.

В экспериментах также использовался нагрев с помощью подогретого до 210°C воздуха со скоростью до 40 м/с, что было приемлемо для моделей, выполненных из органического стекла и полимеризованной эпоксидной смолы типа ЭД-6М [4,5].

Масштабами подобия служили:

- геометрический масштаб по длине $l: L_1 = l_H/l_M=10$;
- масштаб по теплопроводности $a: L_a = a_H/a_M=8$;
- масштаб времени $t: L_t=L_1^2/L_a=1,25$;
- масштаб температуры $T: L_T = T_H/T_M = 10$ (n – натура, m – модель).

Модели блоков выполнялись в виде прямоугольных призм с размерами $(115*65*65)*10^{-3}$ м. Расстояние между нагревателями – $35*10^{-3}$ м, а от края блока – $15*10^{-3}$ м, либо во второй части модели расстояние между нагревателями равнялось $20*10^{-3}$ м. Три оптических элемента клеивались в трех взаимно перпендикулярных плоскостях в блок из органического стекла клеем холодного отверждения. Это позволяло использовать один блок для трех взаимно перпендикулярных просвечиваний в поляризационной установке ППУ-7. Теплофизические и механические свойства оргстекла отличались не более $\pm 7\%$ от свойств оптически чувствительных клеек [4,5]. Для проверки производилась регистрация температурных полей вокруг изучаемых областей хромель-алюмелевыми микротермопарами и сравнивалась с теорией [3].

Просвечивание моделей велось с фотографической регистрацией картин изохром на цветную фотопленку. Трехцветная картина изохром позволяет точнее определить доли полос, поскольку их общее число при $T_{cm}=75^\circ\text{C}$ и $T_r=22^\circ\text{C}$ для $r=10*10^{-3}$ м достигает значений $n \leq 5$ (r – расстояние).

В работе [3] доказано, что в плоской задаче термоупругости в свободных односвязных телах при любом температурном поле распределение термоупругих напряжений не зависит от констант моделирующего материала E, ν, α , а величины напряжений $\sigma \sim \alpha \cdot E$, то для оценки напряженного состояния имеем

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{max} = \sigma_0^{(t)}(T), \quad (2.2)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, α – коэффициент линейного расширения, σ_1 и σ_2 – главные нормальные напряжения в рассматриваемой точке; τ_{max} – максимальное касательное напряжение; $\sigma_0^{(t)}(T)$ – цена полосы пластинки, как функция температуры.

В опытах температура поверхности не превышала 55°C , так как при такой температуре материал модели ЭД-6М изменяет величины E, ν, α и $\sigma_0^{(t)}(T)$ не более, чем на 7% .

Оценка напряженного состояния моделей в сходственные моменты времени проводилась путем фотографической регистрации картин изохром и подсчета порядка полос n в различных точках исследуемых направлений.

Модели изготавливались квадратной формы из листового материала толщиной $6 \cdot 10^{-3}$ м. На поверхности пластин наносилась координатная сетка, а в модели выполнялись канавки (рис. 2.1), имеющие различные заглабления и радиусы закругления.

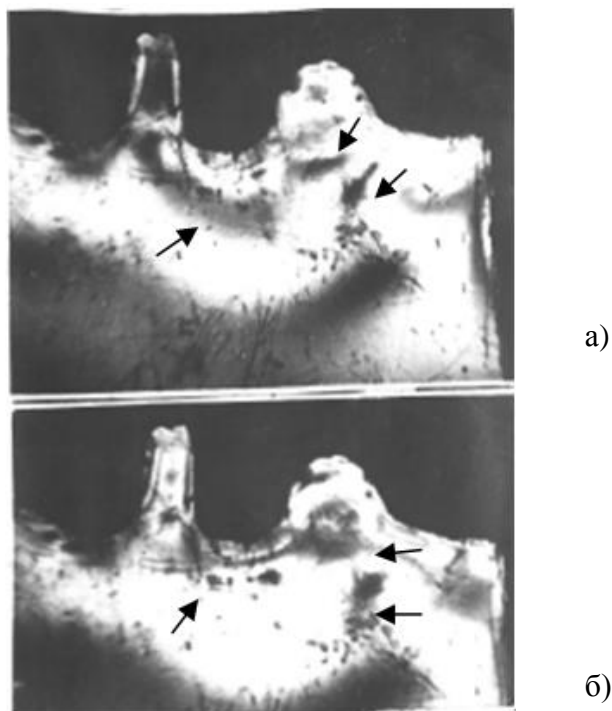


Рис. 2.1 Модель концентратора напряжений в виде канавчатой структуры (масштаб 10:1). Стрелками показаны наиболее опасные зоны при последовательном развитии напряжений, вплоть до критического момента времени (разрушения). Тепловой поток $Q=4,8$ Вт и время его подачи $t_1 = 25$ с (а) и $t_2 = 35$ с (б). Ширина канавки равна $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Нагревательные элементы представляли манганиновую фольгу шириной $6 \cdot 10^{-3}$ м и клеивались в модели. Устанавливался тепловой поток, чтобы температура поверхности не превышала 60°C к сходственному моменту времени $t_m = t_m^{(жс)}/k$, где t_m - сходственные моменты времени в модели при условии $T_n^0 = T_m^0 = 20^\circ\text{C}$ и $T_n = T_m = 600^\circ\text{C}$; $t_m^{(жс)}$ – приведенные сходственные моменты времени в модели с учетом, что $T_n = 600^\circ\text{C}$, $T_m = 60^\circ\text{C}$; «0» - начальное состояние; $k=10$ – коэффициент, учитывающий различие температур T_n и T_m . Приведенное время $\tilde{t}_m^{жс} = k \cdot \tilde{t}_m = k \frac{a_n l_m^2}{a_m l_n^2} \tilde{t}_n = 64$ с.

Анализ картин изохром (рис.2.2) показал, что прогрев канавок приводит к формированию в глубине блока напряженных зон, на создание которых расходуется значительная энергия, а возникающие напряжения могут

приводить к увеличению естественной трещиноватости в теле блока, как и в [4,5];

-уменьшение ширины канавок b_k снижает растягивающие напряжения в массиве блока;

-уменьшение радиусов кривизны поверхностей канавок r_k увеличивает концентрацию напряжений растяжения у поверхностей оснований выступов;

-уменьшение глубины канавок h_k относительно их ширины приводит к улучшению условий формирования напряжений растяжения у основания.

Интерферограммы фиксировались с интервалом в 10 с вплоть до 50-й с, соответствующей разрушению образца. Величины касательных напряжений τ_{max} определялись по подсчету количества целых и долей изохроматических полос.

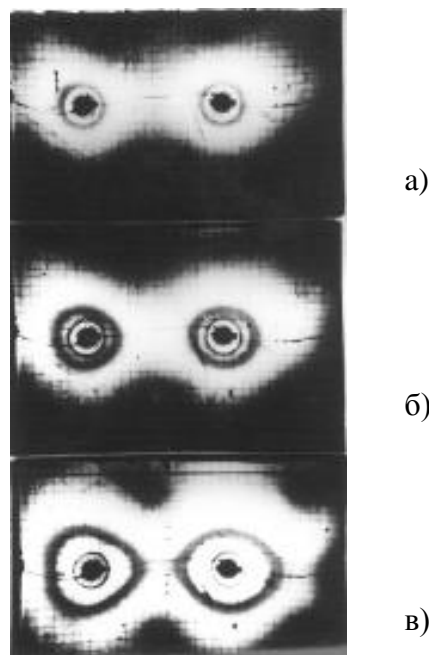


Рис.2.2 Интерферограммы процесса развития во времени касательных напряжений τ в теле модели блока концентратора напряжений, показанного на рис. 18: $t_1=10$ с (а), $t_1=25$ с (б), $t_1=35$ с (в).

На рис. 2.3 представлена эпюра касательных напряжений в области канавок, соответствующая моделям, показанным на рис.2.1 и рис.2.2. Анализ интерферограмм последовательного развития напряжений растяжения τ_{PAC} показывает, что они возрастают в блоке и в выступе пропорционально росту напряжений сжатия в областях АВ и CD только до $t_m^{жс}=30^\circ\text{C}$. Дальнейший прогрев модели ведет к увеличению $\tau_{СЖ}$ в областях нагрева и уменьшению τ_{PAC} , в том числе в основании выступа G. В области G развиваются наибольшие величины τ_{PAC} . Они направлены в противоположные стороны от направления предполагаемого разрушения выступа – линия KNOPL.

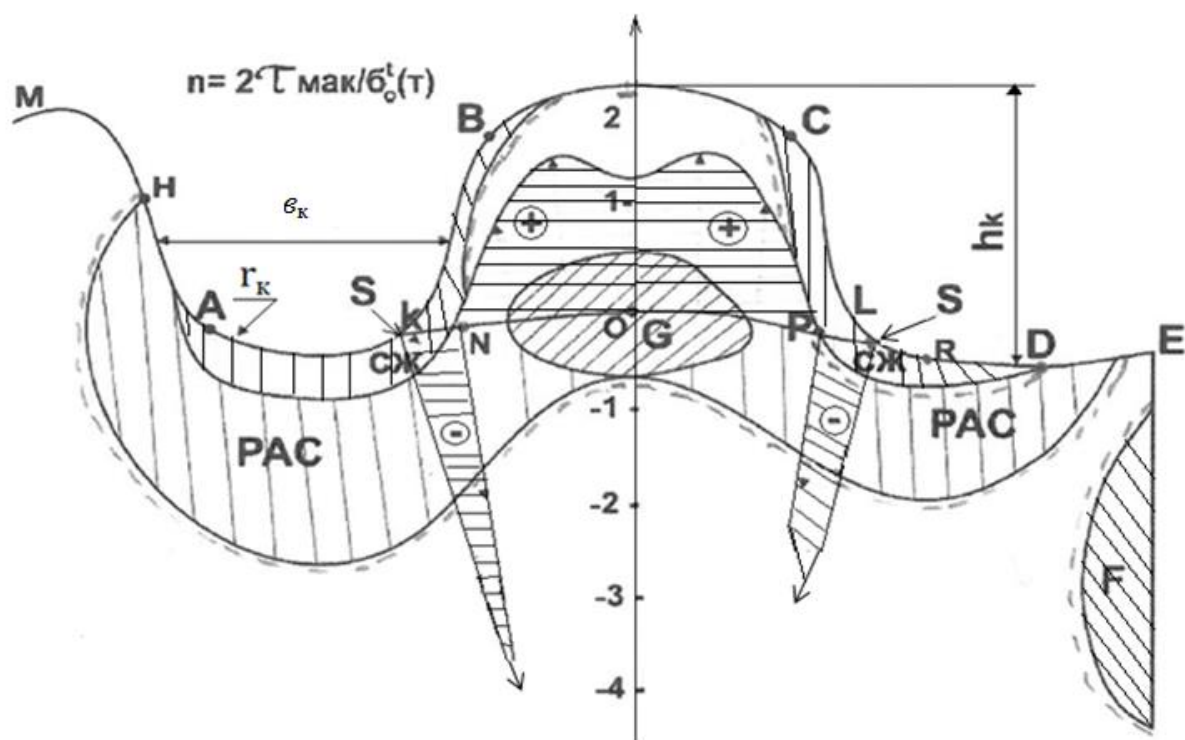


Рис. 2.3 эпюра касательных напряжений в количестве полос МНАКВСДЕ; «--» профиль модели блока; S – направление механического воздействия; PAC – область растяжения; СЖ – область сжатия.

Вдоль линии KNOPL также действует $\tau_{СЖ}$ на участках KN и PL, превосходящие напряжения растяжения τ_{PAC} . Напряженная область оказывается изолированной от поверхности выступов в точках K и L зонами сжатия. Такое положение напряженной зоны G в основании выступов препятствует термическому разрушению выступа от блока.

На свободной поверхности RDE у края блока напряжения $\tau_{СЖ}$ и τ_{PAC} имеют меньшие значения, чем в основании выступа при одинаковой плотности теплового потока по всему контуру нагрева, поскольку в зоне F появляются сдвиговые деформации, которые могут разрушить эту часть блока.

Таким образом, для снижения вероятности возникновения разрушительных трещин в глубине блока канавки должны иметь меньшую ширину по сравнению с глубиной. Наличие механического воздействия S в точках L и K, где зоны с растягивающими напряжениями отделяются от поверхностей зонами напряжения сжатия, существенно интенфицирует развитие трещин.

Сравнение картин деформаций голографических интерферограмм [5] и термических напряжений на интерферограммах, полученных оптико-поляризационным методом, выявило их аналогию, что указывает на взаимосвязь поверхностных и глубинных процессов.

Проведенные исследования показали эффективность оптических методов для трех различных задач: по выявлению механизма процесса

парообразования в пористой структуре, распределения термических напряжений пористого материала и пористой структуры, выполненной в виде канавки [5]; для огнеструйной пассивировки боков горных пород [4] и для канавок турбины они выявили возможность расшифровки интерферограмм и наметили пути снижения вероятности возникновения разрушительных трещин в глубине блока и канавки, а также принципы конструирования различных концентраторов напряжения в турбомашинах. Исследования имеют практическое значение в областях нормального режима эксплуатации турбин, так и для предельного состояния материала, возникшего при переходных режимах (пуск и останов турбомашин). Проведенные исследования согласуются с формулой Нейбера [1], полученной для одиночной канавки при растяжении

$$\sigma_k = \sigma_{ms}^H \left(1 + 2 \sqrt{\frac{h_k}{r_k}} \right) \quad (2.3)$$

где σ_k – термические напряжения, возникающие в корне канавки; σ_{ms}^H – термические напряжения на поверхности ротора при отсутствии канавки; h_k, r_k – глубина и радиус кривизны канавки.

Глубина канавки в современных турбинах может достигать до $8 \cdot 10^{-3}$ м, а радиус – до $5 \cdot 10^{-3}$ м. Однако с целью повышения маневренности крупных энергоблоков имеется тенденция снижать r_k до $2 \cdot 10^{-3}$ м, а h_k – до величин, равных r_k .

Не всякая трещина может привести к хрупкому разрушению материала ротора, а лишь такая, которая достигнет критического размера (По Гриффитсу) [1]

$$l_{кр} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{1,11 \cdot \sigma_{ms}^H} \right)^2, \quad (2.4)$$

где K_c – вязкость разрушения, МН*м^{-3/2}, определяющая сопротивление хрупкому разрушению. Эта величина сильно зависит от температуры материала, резко уменьшаясь с падением температуры. Величина $l_{кр}$ определяется в месте концентрации напряжений (в зоне тепловой канавки) и будет являться усталостной трещиной, при которой произойдет разрушение вала. Размеры возникающих трещин, обнаруживаемые ремонтным персоналом электростанций в зоне концентрации напряжений (рентгеновскими, ультрафиолетовыми, либо магнитными методами дефектоскопии), будут значительно меньше величины $l_{кр}$.

Таким образом, произведенное исследование по характеру распределения термических напряжений вполне согласуется с картиной распределения трещин в зоне замковых соединений и шипов рабочих лопаток, имеющих канавчатую форму ([2], с. 180) (область АKN и DRL); в местах тепловых канавок роторов и в выточках канавчатой формы передних концевых уплотнений и в области преддисконной галтели дисков регулирующих ступеней ([1], с.388). Поэтому выявление даже самых мелких трещин, величина раскрытия которых измеряется несколькими микронами $(8 \cdot 10) \cdot 10^{-6}$ м, позволит избежать крупных аварий.

2.1 Исследование присопловой галтели в энергетических установках

В энергетических установках аварийные ситуации часто возникают в местах различных концентраторов напряжений. Это зоны, где происходит увеличение напряжений в малых областях, примыкающих к местам с резким изменением формы поверхности тела, его сечения или с локализованной неоднородностью материала внутри тела. Концентраторами напряжений могут быть надрезы, выточки, выбоины, полости, усадочные раковины, трещины, инородные включения, царапины. Они являются причиной разрушения тел, т.к. снижают сопротивление тела ударным и тепловым нагрузкам. При удалении от концентратора напряжения быстро убывают. Для количественной оценки вводится понятие номинального напряжения, которое было бы при тех же нагрузках в теле без концентратора напряжений. Распределение напряжений при наличии концентратора напряжений определяется методами теории упругости и пластичности, а также экспериментально (тензометрированием, методом лаковых покрытий, поляризационно-оптическим методом, голографией)[5].

Концентраторы напряжений являются причиной возникновения и развития усталостных трещин в турбинах электростанций, а также статического разрушения деталей из хрупких материалов. В настоящее время эффективны исследования концентраторов напряжений в пространстве. Для этого полезен способ голографической интерферометрии, позволяющий проводить исследования методом деформаций[5].

Сопловые аппараты энергоустановок подвергаются малоцикловой термической усталости, большим статическим и динамическим нагрузкам, высокой температурой газового потока. Поэтому происходит износ и истирание, коррозионная усталость, склонность к коррозионному и эрозионному растрескиванию.

Растрескивание напряженного металла сопла можно рассматривать как процесс, состоящий из нескольких стадий: начальной, когда разрушение идет только в одной микрообласти, и последующих стадий, вовремя которых происходит углубление начального микроразрушения, приводящего к мгновенному разрушению металла (сплава).

Концентраторы напряжений, типа галтелей, вызывают неравномерное распределение напряжений и деформаций при нагружении – разгрузке. В отдельных участках элемента могут возникать пластические деформации. В результате этого после разгрузки в окрестности концентратора возможно возникновение полей остаточных напряжений, отличающихся от таковых при нагружении. Причем в зонах, где возникли пластические деформации при нагружении, реализуются напряжения сжатия, хотя их величина в нормальных условиях не представляет опасности по сравнению с напряжениями растяжения.

Особенно тяжелые условия работы в газотурбинных установках возникают в соплах, работающих в режиме детонационного горения[6,7]. Укороченная диффузионная часть сопла снабжается галтелью, выполненной в виде дугообразного устройства (прилива), причем последний содержит на внешней поверхности капиллярно-пористое покрытие, сообщенное с охлаждающим трактом.

Приведем экспериментальные данные по теплообмену в зоне критического сечения сопла Лавая, выполненного традиционно с приливом, предсопловой галтелью, снабженных капиллярно-пористым покрытием.

Таблица 2.1. Экспериментальные исследования теплообмена по охлаждению камеры сгорания и сопла.

	Тепловая нагрузка $q_{ст}, \times 10^5, \frac{Вт}{м^3}$	7	11	15
	Коэффициент теплоотдачи $\alpha, \times 10^5, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ Прототип по [2]	5,57	9,58	12,7
	Коэффициент теплоотдачи $\alpha^I, \times 10^5, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ покрытие вида 0,08x0,14x1	7,53	15,6	18,3
	Коэффициент теплоотдачи $\alpha^{II}, \times 10^5, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ Покрывтие вида 1x1x1	7,27	14,1	16,1
	Коэффициент теплоотдачи $\alpha^{III}, \times 10^5, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ Покрывтие вида 0,4x0,14x0,08	6,93	12,8	14,3

Опыты проводились на горелке, выполненной по модели ТР-14/22-5[1] (прототип), работающей на кислородно-керосиновой смеси, и на горелке, в которой зона критического сечения сопла Лавая оформлена конструктивно в виде прилива и предсопловой галтели, снабженных капиллярно-пористым покрытием.

В таблице 2.1 приняты обозначения:

$q_{ст}$ – тепловая нагрузка, приходящаяся в стенку сопла Лавая;

α – коэффициент теплообмена со стороны охладителя для конструкции прототипа;

$\alpha^I, \alpha^{II}, \alpha^{III}$ – коэффициенты теплообмена со стороны охладителя для предлагаемой системы, причем капиллярно-пористое покрытие имело вид 0,08x0,14x1; 1x1x1; 0,4x0,14x0,08 соответственно.

Капиллярно-пористое покрытие вида 0,08x0,14x1 означает, что оно собрано из трех слоев металлических сеток, установленных

последовательно с размером ячеек соответственно: $0,08 \cdot 10^{-3}$ м; $0,14 \cdot 10^{-3}$ м; $1 \cdot 10^{-3}$ м, причем сетка $0,08$ с наименьшим размером примыкает к поверхности прилива и предсопловой галтели.

Как видно из таблицы 2.1, предлагаемая система охлаждения имеет лучшие характеристики по теплообмену, причем наибольшая интенсивность теплообмена достигнута для покрытия $0,08 \times 0,14 \times 1$ и превысила величину α по сравнению с прототипом примерно в 1,5 раза.

В эксперименте сетки с ячейками менее $0,08 \cdot 10^{-3}$ м не рассматривались, так как они ухудшают форсировку процесса теплообмена за счет возможных локальных образований легкой фазы и создают дополнительное высокое гидравлическое сопротивление. Большие размеры ячеек ($1 \cdot 10^{-3}$ м) определены из условия капиллярного впитывания охладителя, которое обеспечивает самоприспосабливаемость, управляемость процессом и создает равномерную устойчивую пульсирующую пленку жидкости на теплоотводящей поверхности горелки.

Выполнение укороченной части сопла Лавая в виде прилива, то есть выступа (или пояска), образующего утолщение, позволяет существенно увеличить теплоаккумулирующую способность сопла, определяемую произведением трех величин: $\rho \cdot c \cdot \lambda$. Здесь принято: ρ – плотность, c – теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности металла прилива соответственно. Учитывая, что в качестве металла применяется медь, то ее теплоаккумулирующая способность будет наибольшей. Например, λ для меди в 20 раз больше, чем для нержавеющей стали. Как показали опыты, коэффициент теплообмена и критические отводящие тепловые потоки пропорциональны [6,7]:

$$\alpha' \sim 1,5 \cdot \left[1 + \frac{(\rho \cdot c \cdot \lambda)_{\text{ж}}}{(\rho \cdot c \cdot \lambda)_{\text{ст}}} \right]^{-1} \text{ и } q_{\text{кр}} \sim 1,5 \cdot \left[1 + \frac{(\rho \cdot c \cdot \lambda)_{\text{ж}}}{(\rho \cdot c \cdot \lambda)_{\text{ст}}} \right]^{-1}, \quad (2.5)$$

где индексы «ж», «ст» и «кр» означают, что величины относятся к жидкости, стенке и критическому состоянию, что предотвращает разрушение сопла Лавая, которое, как правило, является самым уязвимым местом горелки, и в подавляющем большинстве случаев разрушается первым. Тепловая защита сопла особенно актуальна в предаварийных ситуациях (локальное образование пузырей, мгновенное, даже кратковременное, прекращение подачи охладителя). Наличие капиллярно-пористого покрытия, как показали оптические методы исследования [5,7] (голографическая интерферометрия и скоростная киносъемка), позволяет создать весьма равномерную, устойчивую пульсирующую пленку охладителя на внешней поверхности сопла, выравнивая температурное поле в охлаждаемых стенках. Это достигается за счет совместного действия инерционных (сил давления) и капиллярных сил, причем наибольший эффект имеет место для анизотропной сетчатой структуры вида $0,08 \times 0,14 \times 1$ (см. таблицу 2.1). Оптимизированный нами вид структуры позволяет иметь высокую самоприспосабливающуюся способность к переменным и максимальным тепловым нагрузкам, что

управляет процессом тепломассообмена в номинальных и нештатных режимах.

В торцевой части прилива дополнительно выполняется предсопловая галтель в виде тепловой канавки (дугообразная пористая канавка). Она представляет собой выемку (глухое отверстие), в которой также установлено капиллярно-пористое покрытие вида 0,08x0,14x1, через которое протекает охладитель. Происходит дополнительное высокоинтенсивное охлаждение особо опасной теплонапряженной зоны, причем тепловая канавка выполняет функцию компенсации термических удлинений в зоне сопла и снятия концентрации термических напряжений. В прототипе отсутствие такого технического решения приводило к малоцикловой термической усталости металла сопла, невысокому ресурсу его работы вплоть до разрушения.

Описанные технические решения позволили в 1,5 раза увеличить ресурс работы горелки, сократить расход охладителя в 4 раза (за счет того, что стало возможным увеличить в 4 раза нагрев воды, сохранив устойчивость пленки охладителя и снизить расход энергии на привод электродвигателя в 4 раза).

Особо отметим, что ресурс работы горелки увеличивается за счет следующих обстоятельств: интенсификации теплообмена; расширения процесса отвода критических тепловых нагрузок; создания равномерного температурного поля в наиболее теплонагруженной зоне горелки (критического сечения сопла Лавалья); управления теплообменом при переменных, номинальных, форсированных и нештатных (экстремальных) режимах; снижения концентрации термических напряжений, что снимает усталостные явления (малоцикловую термическую усталость материала конструкции) и исключает возникновение резкопеременных разрушающих нагрузок.

Рассчитаем термические напряжения в предсопловой галтели. Технология изготовления предсопловой галтели определяется из следующих расчетов.

Температурные напряжения σ , возникающие в корне галтели, равны:

$$\frac{\sigma}{\sigma_h} = 1 + \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (2.6)$$

где σ_h – температурные напряжения на поверхности прилива сопла Лавалья при отсутствии галтели;

h - глубина галтели;

r - радиус скругления галтели.

Величина σ_h равна

$$\sigma_h = -\frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha_m E}{1-\mu} \Delta T, \quad (2.7)$$

где α_m – коэффициент линейного расширения;

E – модуль упругости;

μ - коэффициент поперечного сжатия;

ΔT – максимальная разность температур холодного и горячего прилива сопла.

Практически сопла Лавалья в горелках выполняются из нержавеющей стали и меди. Термомеханические свойства сведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Термомеханические свойства материала сопел.

	$\sigma_s,$ МПа	E, МПа	$\alpha,$ $\frac{1}{K}$	μ -	$\Delta T, K$
Легированная сталь 20ХМЛ	310	$21 \cdot 10^4$	$11 \cdot 10^{-6}$	0,3	100
Медь М1	75	9,2	$16,5 \cdot 10^{-6}$	0,35	30

Определяем σ_n для стали и меди соответственно:

$$\sigma_n' = -\frac{2}{3} \cdot \frac{11 \cdot 10^{-6} \cdot 21 \cdot 10^4}{1 - 0,3} \cdot 100 = -200 \text{ МПа};$$

$$\sigma_n'' = -\frac{2}{3} \cdot \frac{16,5 \cdot 10^{-6} \cdot 9,2 \cdot 10^4}{1 - 0,35} \cdot 30 = -46,5 \text{ МПа}.$$

В таблице σ_s – пределе текучести.

Тогда $\sqrt{\frac{h}{r}} \leq \frac{\sigma}{\sigma_n} - 1 \leq \frac{\sigma_s}{\sigma_n} - 1$.

Отношение для стали и меди соответственно:

$$\left(\frac{h}{r}\right)' \leq \left(\frac{310}{220} - 1\right)^2 = 0,168;$$

$$\left(\frac{h}{r}\right)'' \leq \left(\frac{75}{46,5} - 1\right)^2 = 0,375.$$

Следовательно, для стали и меди получаем:

$$h' \leq 0,17 \cdot r; h'' \leq 0,38 \cdot r.$$

С учетом условий эксплуатации, отношение $\frac{h}{r}$ не должно превышать $0,2 \div 0,4$, т.е. радиус скругления галтели должен быть в $(2,5 \div 5)$ раз больше ее глубины.

Таким образом, у сопла увеличивается срок службы за счет интенсификации теплопередачи, увеличения отводных тепловых нагрузок, выравнивания температурного поля в охлаждаемых стенках, повышения теплоаккумулирующей способности сопла и самоприспосабливающейся способности капиллярно-пористого покрытия, что особенно важно в момент возможных аварийных ситуаций. Компенсируются термические

удлинения, снимаются концентрации термических напряжений, что исключает возникновение резкопеременных разрушающих нагрузок.

3 Оценка тепловых потоков, возникающих в концентраторах напряжений турбин электростанций.

Концентраторы напряжений, которые имеют место в современных паровых и газовых турбинах электростанциях, являются источником многих аварий и несчастных случаев.

Хрупкие разрушения роторов являются наиболее опасными, поскольку они влекут за собой, как правило, полное разрушение всего цилиндра турбины, серьезные повреждения другого оборудования, а иногда и человеческие жертвы. Такие поломки происходят внезапно, и этим усугубляется тяжесть их последствий[1].

Хрупкие разрушения могут возникнуть по следующим основным причинам:

- 1) Из-за плохого качества материала ротора;
- 2) Из-за высоких динамических напряжений при внезапной и сильной разбалансировки ротора;
- 3) При неправильном проведении пуска из холодного состояния.

Ротор в процессе производства проходит тщательный контроль. Особенно опасными являются флокены - газообразные включения, образующиеся в отливке при неправильной технологии производства и в дальнейшем при поковке превращающиеся в сетку пятен и трещин.

Трещины на внутренней поверхности осевого сверления ротора могут появиться и в процессе эксплуатации в результате ползучести и истощения длительной прочности. Поэтому при капитальных ремонтах турбины, особенно прослужившей достаточно долгое время, тщательно осматривается расточка ротора[2].

При внезапной разбалансировке ротора, например, при вылете длинной лопатки, появляется поперечная неуравновешенная сила. Даже пластические материалы при динамических нагрузках разрушаются хрупко. Высокие динамические напряжения изгиба в сбалансированном роторе приводят к быстрому появлению трещины усталости, ее развитию и хрупкому разрушению.

Особую опасность для ротора представляют пуски из холодного состояния, если последние производятся слишком быстро и ротор не успевает прогреться.

Трещины в роторах и валах турбин могут образовываться не только на внутренней расточке, но и на поверхности вследствие усталости или малоциклового термической усталости материала.

При вращении колеблющегося вала в нем возникают изгибные напряжения, достигающие максимальных значений на его поверхности. Особенно значительны они в местах концентрации напряжений, т.е. в местах резких изменений диаметров сечений, в тепловых и шпоночных канавках.

Высокие температурные напряжения в сочетании с напряжениями от центробежных сил могут привести к недопустимому возрастанию напряжений на расточке ротора. При пуске еще большие температурные напряжения возникают в роторе на его поверхности, которая имеет непосредственный контакт с паром. Эти напряжения многократно усиливаются концентрацией напряжений. Даже при умеренных скоростях пуска турбин в местах концентрации возникают столь значительные напряжения, что происходит пластическое течение материала. Это приводит к тому, что при выходе агрегата на стационарный режим в роторе появляются остаточные напряжения, которые релаксируют накопление повреждений в материале за счет ползучести. При многократном повторении таких пусковых напряжений в роторе возникают трещины малоциклового термической усталости.

В практике на турбинах большой мощности зарегистрированы случаи появления трещин усталости в цельнокованных роторах цилиндра низкого давления, в переходе от последнего диска к шейке вала, на которой размещено концевое уплотнение. Постепенное развитие и ступенчатый характер трещин свидетельствовали об их усталостном происхождении. По-видимому, значительную роль в появлении и развитии трещин сыграли образующиеся в них концентрированные солевые растворы, сильно снижающие сопротивление материала усталости[1].

При образовании трещин наблюдалось возрастание уровня вибрации подшипника.

Трещины термической усталости обычно возникают в тех местах турбины, где температура изменяется значительно, и достигает максимальных значений, имеются резкие переходы, надрезы, галтели. Как правило, это область первой ступени ЦВД и ЦСД, и зона уплотнений первой диафрагмы или ближайшего отсека концевое уплотнения. Особую опасность представляют собой тепловые (компенсационные) канавки. В этих местах напряжения могут в 5-6 раз превышать номинальные напряжения[2].

Другим слабым местом является галтель между диском первой ступени и валом, которая подвергается тщательной полировке для уменьшения концентрации температурных напряжений.

Вибрация лопаток и дисков и связанные с ней усталостные разрушения происходят под действием периодических импульсов со стороны парового потока. Диски лопаток и турбин имеют большое число собственных частот и форм колебаний. Из них наибольшее значение имеют две формы колебаний: зонтичные и веерные. Опасными для турбинных дисков являются веерные колебания с числом узловых диаметров от двух до шести.

Опасным вибрациям подвержены только тонкие диски, частота собственных колебаний которых мала. Для исключения возможности резонанса диск «настаивают», снимая с его боковых поверхностей часть металла для изменения частоты собственных колебаний.

При вибрации в материале диска проявляется явление усталости металла, ведущее к появлению трещины усталости. Трещины возникают в местах концентрации напряжений: разгрузочных отверстиях, галтелях, царапинах и рисках.

Особенно опасным местом диска является его обод, на котором крепятся лопатки. Форма обода сложна, лопаточный паз имеет скругления малого радиуса, в которых действуют повышенные напряжения. Эти напряжения еще более увеличиваются при неплотной установке лопатки в диске, когда на диск начинают действовать наряду с центробежной силой лопатки и переменные напряжения от ее колебания.

Поскольку в концентраторах напряжений в конечном счете сосредотачивается теплота, то представляет интерес произвести оценку удельных тепловых потоков, вызывающих различные виды напряжений в элементах статора и ротора турбины. Следует ожидать, что удельные тепловые потоки могут достигать величин порядка $(10^6 \div 10^7)$ Вт/м² и более.

Это предположение следует из того, что выделение теплоты может происходить от трения при задеваниях ротора. Особо опасные тепловые потоки возникают в режимах пуска и останова турбомашин, т.к. происходят фазовые изменения теплоносителя (рабочего тела). При этом возникают взрывообразно за $(10^{-6} \div 10^{-7})$ с паровые пузыри на поверхности турбины, либо происходит схлопывание пузырей в процессе конденсации пара.

При термическом воздействии на концентратор через некоторое время часть поверхности нагревается до определенной температуры, в других частях элемента турбины сохраняется начальная температура. Поэтому внутри металла возникает градиент температуры, вследствие чего металл расширяется неравномерно. Окружающие ненагретые слои оказывают сопротивление этому расширению. В результате возникают термические напряжения как в нагретой части, так и в окружающем ненагретом массиве. Эти напряжения могут достигать разрушающих значений.

В работах [5,8,9] приведено решение задачи о термоупругих напряжениях для идеализированных процессов. Доминирующую роль в процессе разрушения играли нормальные сжимающие напряжения. Разрушение концентратора происходило в результате потери устойчивости в тонком слое, прилежащем к свободной поверхности. Поэтому рассматривалось напряженное состояние верхнего слоя, толщина которого зависит от коэффициента теплоотдачи и структуры металла.

В нагреваемом металле бурно возрастает плотность вакансий, которые быстро объединяются в полости, т.к. интенсивность процесса объединения вакансий пропорциональна квадрату их плотности. Если полости вакансий могут превращаться в дислокации, то материал приобретает пластические свойства и не разрушается под действием теплоты. Таковы все металлы. Этим свойством обладают также и некоторые капиллярно-пористые структуры.

Если же в материале дислокации не образуются, то растущие полости вакансий концентрируют на своих краях напряжения и ведут к разрушению структуры в то время, когда термические напряжения еще не достигают предела пластической текучести. Происходит хрупкое термическое разрушение.

Для познания механизма процесса разрушения проведены опыты с применением методов фотоупругости и голографии[5].

Оценка напряженного состояния моделей в сходственные моменты времени производилась путем фотографической регистрации картин изохром и подсчета порядка полос в различных точках исследуемых направлений.

Модели изготавливались квадратной формы из листового материала ЭД-6 М толщиной $5 \cdot 10^{-3}$ м. На поверхность пластин наносилась координатная сетка, а в модели выполнялись канавки, имитировавшие пористую структуру концентратора и имеющие различные заглабления и радиусы закругления. Нагревательные элементы представляли нихромовую фольгу с шириной полосы $5 \cdot 10^{-3}$ м и клеивались в модели клеем холодного отверждения.

Решение задачи термоупругости позволяет определить предельное состояние пористой и металлической парогенерирующей поверхности.

При термическом разрушении пористой структуры и металлической стенки требуется выяснить влияние величины удельного теплового потока, подводимого к поверхности, и времени его воздействия на создание разрушающих напряжений и глубину проникновения температурного возмущения.

При возрастании величины q за очень короткий промежуток времени динамические эффекты становятся весьма значительными, напряжения сжатия достигают больших значений, часто в несколько раз превышающих предел прочности материала на сжатие. Поэтому необходимо учесть эти напряжения в механизме термического разрушения материала. Требуется выяснить, какой вид напряжений достигает раньше своих предельных значений.

Рассмотрим пластину толщиной $2h$. К поверхности $z=+h$, начиная с момента времени $t=0$, подводится постоянный удельный тепловой поток. Нижняя поверхность $z=-h$ и боковые края пластины – теплоизолированы.

Для пластин, выполненных из пористых материалов, меди и нержавеющей стали функциональные зависимости q_1, q_2, q_3 рассматривались на ЭВМ. Термомеханические характеристики структуры металлов представлены в [9]. В результате расчетов показаны на рис. 5.1, 5.2.

В случае пористой пластины тепловые потоки подсчитаны для широкого интервала времени – $10^{-8} \dots 10^3$ с. Нижний предел этого интервала (10^{-8} с) – время релаксации. Для интервалов времени $10^{-8} \dots 10^{-3}$ с соотношения для величин q_1, q_2 и q_3 теряют физический смысл. Поскольку

терморазрушение – макропроцесс, принимаем его протекающим за время $5 \cdot 10^{-3} \dots 10^3$ с.

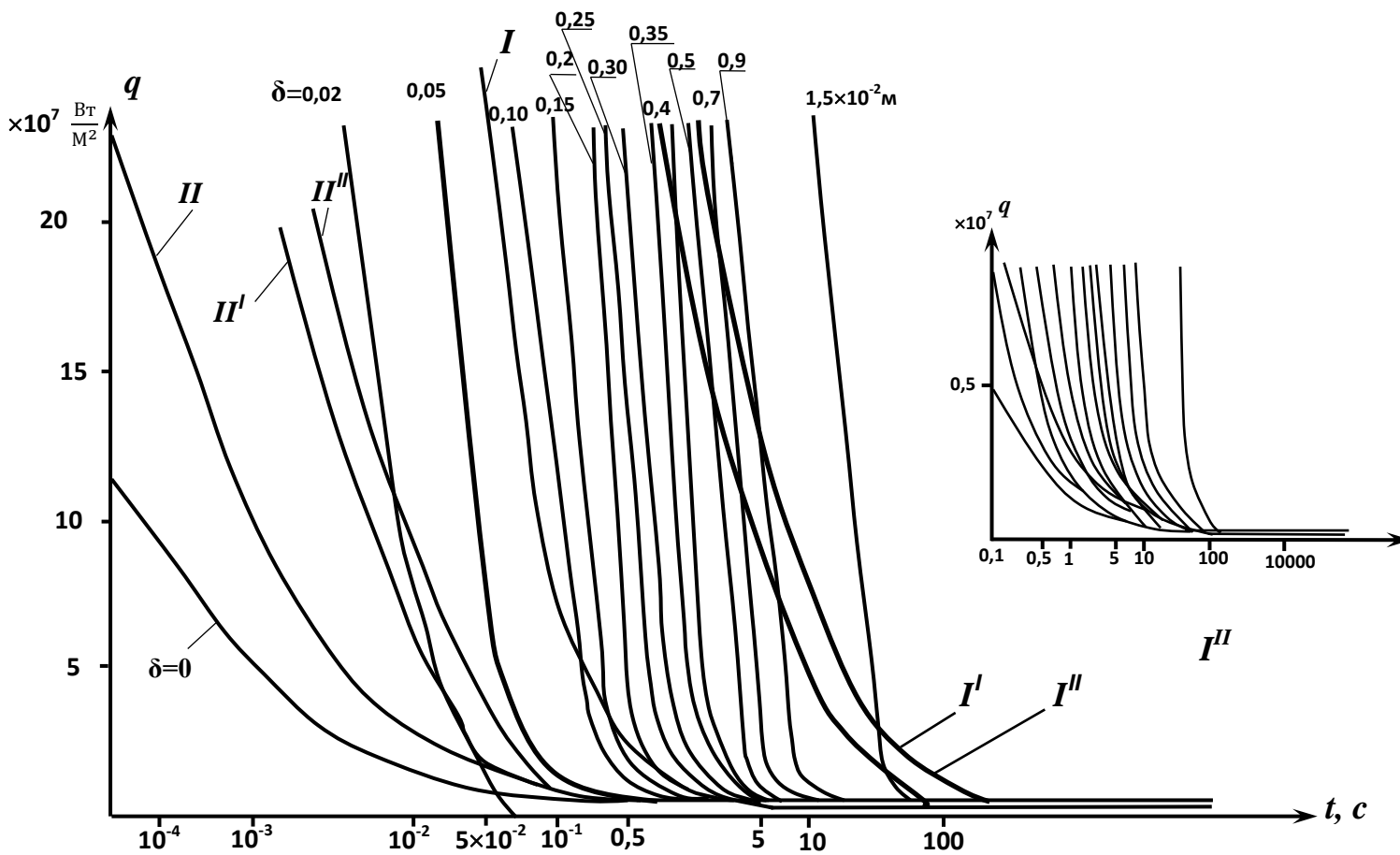


Рис.3.1 Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия в области концентраторов напряжений в зависимости от времени действия для различной глубины проникновения тепловой волны δ : I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения (I', I'' – медь и нержавеющая сталь, $h=0,1 \times 10^{-3}$ м); II - оплавление поверхности (II', II'' – медь и нержавеющая сталь, $h=0,1 \times 10^{-3}$ м); h – толщина стенки.



Рис.3.2 Зависимость q и $f(t)$, представленная на рис. 3.1, в диапазоне $q=(0,25\dots0,75)*10^7\text{Вт/м}^2$

Участки кривых сжатия, определяющие глубину проникновения $\delta > 0,3*10^{-2}\text{м}$ для больших величин q и малых t , экранируются кривой плавления II, а в случае малых тепловых потоков и значительных интервалов времени – кривой растяжения I. Кривая плавления пористой поверхности пористостью $\epsilon=5\%$ проходит значительно выше, чем у поверхности с $\epsilon=30\%$, что объясняется её устойчивое хрупкое разрушение.

Для металлов кристаллы разрушаются при напряжениях до $10^{-5}E$, где E - модуль Юнга. Процесс состоит из стадий зарождения трещин и их развития. В результате термического воздействия возникают микротрещины в области концентраторов напряжений (включений, неоднородностей). Высокие внутренние напряжения также могут появляться вследствие неоднородного протекания пластической деформации, после чего наступает хрупкое разрушение, аналогично пористому материалу. Пластическая деформация при этом рассматривается как первопричина разрушения, хотя она может задерживать рост трещин[10].

В основе разрушения, с одной стороны, лежат разрывы межатомных связей, обусловленные тепловыми флуктуациями, а с другой – разрушение есть кинетический термоактивационный процесс, когда происходит перемещение вакансий к трещинам, рост которых определяет кинетику разрушения. В окрестности острия концентратора возникает высокая интенсивность напряжений и наступает пластическое течение материала или распространение хрупкой трещины. Устанавливается предельное равновесие хрупких тел с трещинами.

Таким образом, механизм разрушения металлов принципиально отличается от механизма разрушения пористых материалов. Ряд термомеханических свойств также различен. Несмотря на это, на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности при граничных условиях второго рода проведена аналогия в поведении материалов в предельном состоянии и выявлены зависимости тепловых потоков от времени их действия и глубины проникновения температурных возмущений, что позволяет предсказывать и предотвращать возникновение таких состояний для металлической поверхности и подбирать оптимальные тепловые нагрузки для пористых материалов.

3.1 Моделирование процесса задевания ротора турбины.

Концентраторы напряжений в турбомашинах являются источником аварий и несчастных случаев персонала на электростанциях [1].

Особое внимание должно быть обращено на устранение концентраторов напряжений, при ремонте которые приводят к усталости металла (снижают предел усталости) и служат первоисточником появления усталостных трещин и изломов. Примерами концентраторов служат плохая обработка поверхности (шероховатость, риски, забоины и др.), резкие изменения формы или размеров (отверстия, выточки и т.п.), неправильные переходы от одного диаметра к другому (острые углы или недостаточные радиусы закруглений), действие внешней среды (коррозия) [2].

С целью уменьшения напряжений и повышения предела усталости все уступы и переходы должны выполняться с закруглениями или переходами по плавной кривой (галтели) валов, дисков и других напряженных деталях. Повышение предела усталости достигается шлифованием, полировкой деталей.

Для деталей, работающих продолжительное время при постоянном напряженном состоянии, особенно в области высоких температур, проявляется свойство металла медленно и непрерывно пластически деформироваться – «ползти», даже в тех случаях, когда рабочие напряжения лежат значительно ниже предела текучести при данной температуре. В зависимости от температуры и нагрузки деформация ползучести может продолжаться вплоть до разрушения.

При производстве ремонтных работ после очистки ротор осматривается оптическими приборами, особенно в зонах с концентраторами

напряжений. Напряжения возникают в кольцевых выточках, галтелях, переходах сечений от одного диаметра ротора к другому, в шпоночных канавках, отверстиях, резьбовых соединениях, на кромках без достаточных радиусов закругления, а также в деталях при их горячей посадке с завышенными натягами, вызывающими большие удельные давления. Концентраторами напряжений могут быть дефекты, возникающие в процессе эксплуатации и ремонта: насечки, риски, пробойны, наклеп, разъедания поверхности. Причиной появления этих дефектов могут быть грубая обработка и повреждения поверхностей (удары), износ от попадания твердых частиц, паразитные токи, эрозия, коррозия, вибрация.

Обработка рабочих поверхностей для горячей посадки деталей на вал (диски, втулки, центрирующие кольца) должна проводиться с частотой, соответствующей 6-8-му классу. Чистота поверхности повышает длительную прочность и коррозионную стойкость. Поэтому после обработки производят полировку мест горячей посадки до полного удаления следов резца. Натяг горячей посадки должен быть рассчитан на сохранение плотной посадки при пуске турбины, когда диски прогреваются быстрее вала, при числе оборотов, когда срабатывает предохранительный выключатель; ослабление посадки между сопрягаемыми деталями может привести к наклепам, контактной коррозии и опасным напряжениям, связанным с вибрацией[1,2].

Галтели, углы, кромки и другие переходные места должны быть обработаны с требуемыми радиусами закруглений и с последующей шлифовкой. Сверловка отверстий, нарезки резьбы, обработка и устройство новых шпоночных канавок, кольцевых выточек и других углублений могут быть допущены только в особых случаях, с обеспечением необходимой прочности деталей и с принятием мер для устранения очагов концентрации напряжений.

Оставление трещин во вращающихся деталях при таких условиях не может быть допущено; расчистка трещин должна производиться до полного их удаления, с закруглением краев образующейся канавки. Если обработка трещины приводит к недопустимому ослаблению детали, то она бракуется.

Повреждение вала в виде царапин, задиров, рисок (особенно опасны глубокие, идущие вдоль шейки), а также коррозионные повреждения (ржавление) и шероховатости рабочих поверхностей устраняются в зависимости от величины дефекта и его направления проточкой с последующей шлифовкой или только шлифовкой.

Различные дефекты на поверхности лопаток в виде рисок, царапин, шероховатостей и плохой полировки, а также выточки, резкие переходы сечений, надрезы и наклеп в местах расклепки бандажа являются очагами местных напряжений, способствующих разрушению лопаток. Чаще всего в зонах концентрации напряжений при определенных условиях начинается и развивается разрушение рабочих лопаток, дисков и других деталей турбины.

Для изучения концентраторов напряжений рассмотрим выделение теплоты, имеющее место при задеваниях ротора турбины. Моделирование произведем для случая имитации процесса задевания тремя гребнями лабиринтовых уплотнений. Для этих целей исследуемая модель содержит три термоэлемента, соединенных параллельно, а концы спиралей заделываются в медные электроды, размещенные в торце (малой вертикальной грани). Образец имел размеры 90x60x25 мм. Просверливалось три отверстия перпендикулярно поверхности грани 60x25 мм на глубину 12 мм диаметром 6 мм. Провода термоэлементов выводились на ту же грань.

Исследования проводились с применением голографии, когда регистрация интерферограмм осуществлялась в реальном масштабе времени. Изучались напряжения в предельном состоянии материала, создаваемого термоэлементами. Мощность определялась с точностью $\pm 1,6\%$ [5].

Метод голографической интерферометрии позволяет изучать напряженное и деформированное состояние материала и измерять достаточно малые деформации, имеющие место в концентраторах напряжений.

Деформации регистрировались на поверхности образцов в реальном масштабе времени. Также фиксировались картины полей тепловых напряжений и места их концентраций.

Изменяя диаметр сверления отверстий от 3 до 6 мм и подводимую мощность от 7 до 30 Вт, можно было получать удельные тепловые потоки, равные $(0,25 \div 4,2) \cdot 10^6$ Вт/м².

Анализ интерферограмм показал следующее (рис. 3.3). Расширение образца наблюдается вначале вокруг источника тепла, а затем во всем объеме. Деформация объема образца зависит от распределения температурного поля, создаваемого источниками тепла, и возникающих термических напряжений на поверхности и в объеме тела.

Сравнение картин деформаций голографических интерферограмм и термических напряжений на интерферограммах, полученных оптико-поляризационным методом [5], выявило их аналогию, что указывает на взаимосвязь поверхностных и глубинных процессов.

Обнаружено, что образцы с малой пористостью $E=(5 \div 20\%)$ находятся в более напряженном состоянии по сравнению с вязкими и пористыми средами $E=(40 \div 90\%)$. Увеличение мощности теплового потока в два раза приводило у них рост деформации на поверхности до трех раз, тогда как у образцов с большой пористостью – лишь в полтора раза.

Число интерференционных полос на единицу длины выше у пород с низкими значениями пористости, что означает наличие в них больших термических напряжений, скорость роста которых увеличивается с ростом тепловой нагрузки.

Интерферограммы позволили обнаружить дефекты и трещины, непросматриваемые визуально, а также крупные включения, в области которых линии равных деформаций имели изломы.

Расшифровка голографических интерферограмм производилась по методике [11]. Определялось направление вектора смещения \vec{d} . Величина \vec{d} находилась по фотографии интерференционной картины: $|\vec{d}| = N \cdot \lambda / (1 + \cos \varphi)$ где N – измеренное число полос между исследуемой точкой и полосой нулевого порядка; λ – длина волны; φ – угол между направлением освещения \vec{r}_0 исследуемой точки и наблюдения \vec{r}_n этой точки на голограмме, т.е. $\vec{r}_n \wedge \vec{r}_0$.

Градиент перемещений, определяющий величину деформаций для одного теплового источника, имел наибольшее значение в области нагревателя радиусом до $10 \cdot 10^{-3}$ м и возрастал с увеличением времени теплового воздействия (рис. 3.4). В случае трех одновременно действующих источников тепла, каждый из них создавал независимое поле перемещений, которое с ростом времени нагрева приводило к простой суперпозиции на поверхности образца (рис. 3.5). Это явление имело место как для полей перемещений вдоль плоскости, проходящей через центры источников, так и для плоскостей, отстоящих от них на расстоянии $6 \cdot 10^{-3}$ м.

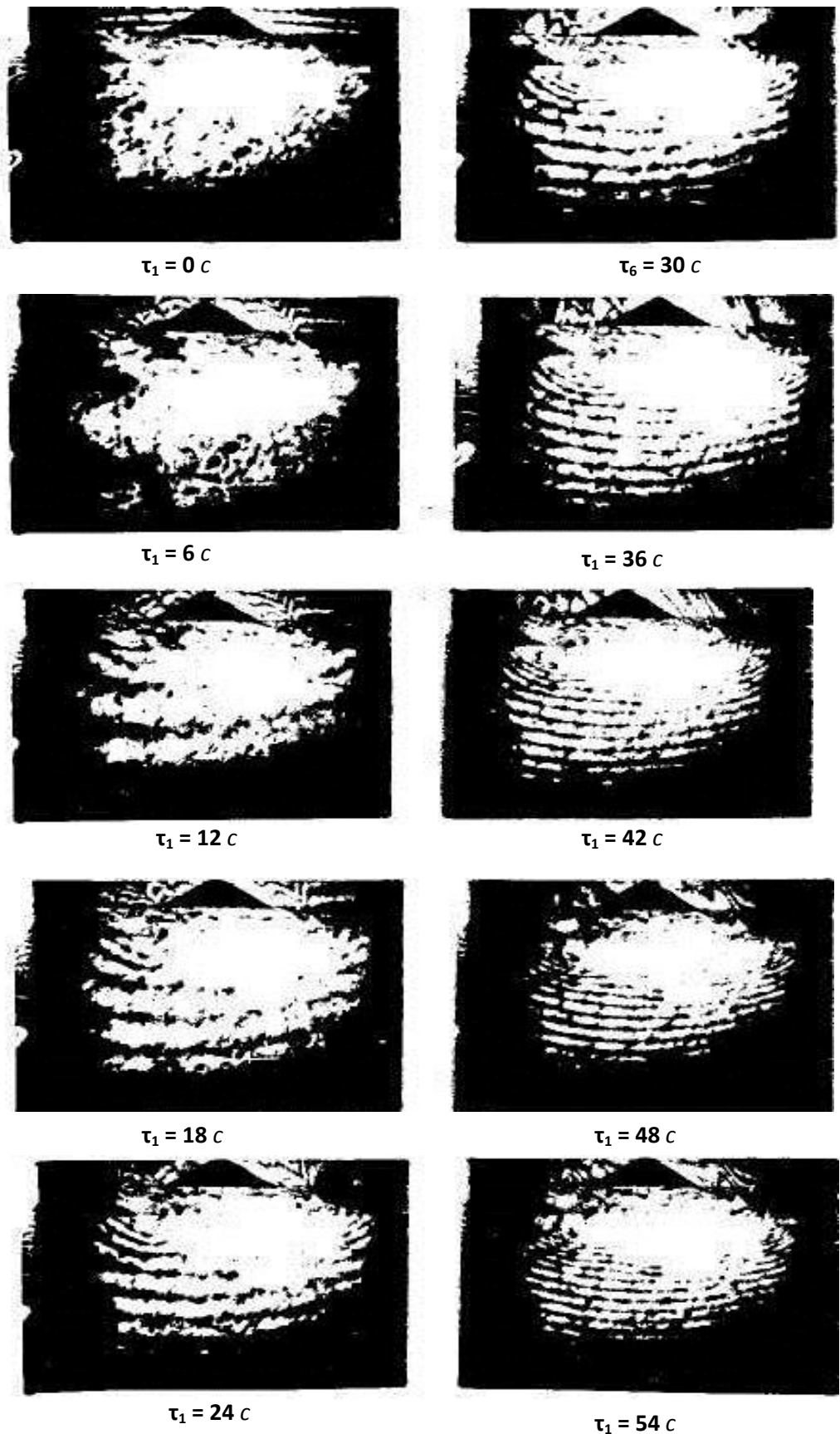


Рис. 3.3 Голографические интерферограммы пористого образца с малой пористостью ($E=5\%$), отображающие состояние поверхности через каждые 6с вплоть до предельного состояния, при тепловом потоке $Q=15\text{Вт}$ ($q=0,5 \cdot 10^6 \text{Вт/м}^2$)

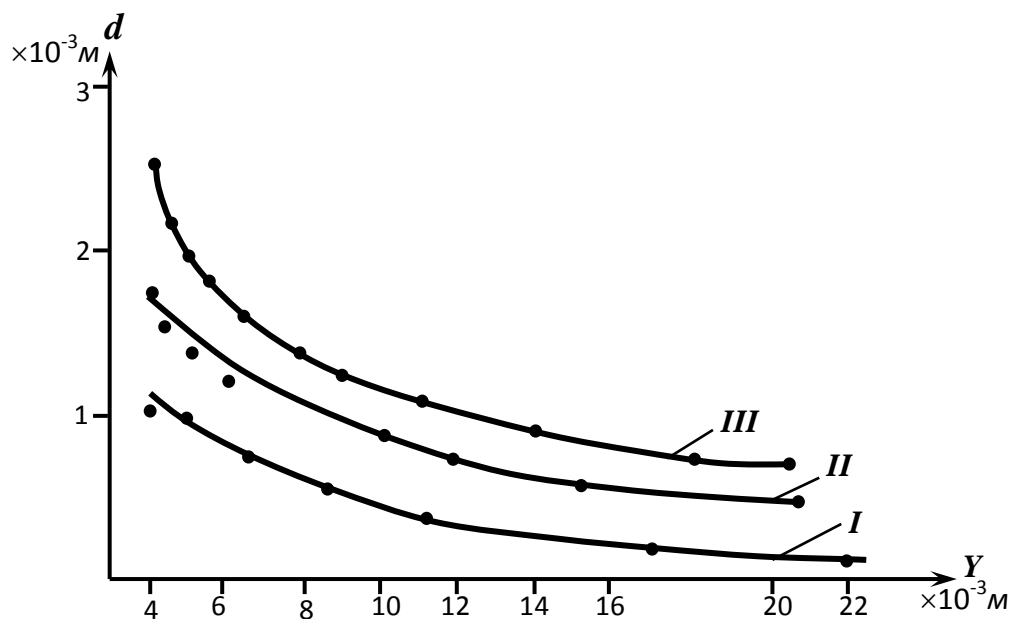


Рис.3.4 Зависимость перемещений вдоль поверхности образца от центра теплового источника при $q=5,5$ Вт для различного времени теплового воздействия: I – $t=15\text{с}$; II – $t=25\text{с}$; III – $t=30\text{с}$. Один нагреватель, $x=0$, угол - $38^{\circ}55'$

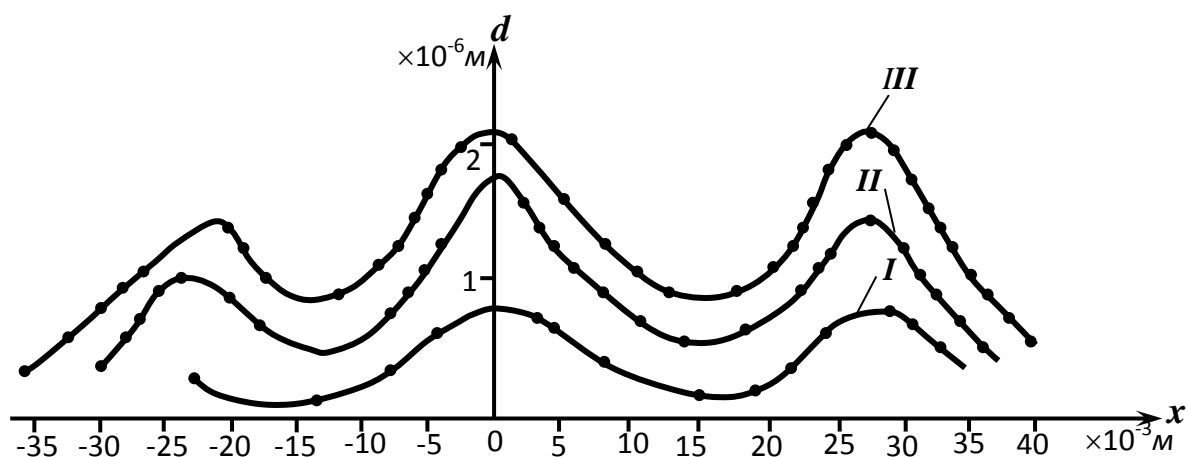


Рис. 3.5 Зависимость перемещения по плоскости, параллельной плоскости центров тепловых источников ($y=6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$), поверхности образца при $Q=4,8$ Вт для различного теплового воздействия: I – $t=15\text{с}$; II – $t=25\text{с}$; III – $t=30\text{с}$, угол - $38^{\circ}55'$

Знание закона распределения напряжений в материале позволяет уменьшить вероятность возникновения разрушительных трещин при проектировании, изготовлении и ремонте турбомашин.

Таким образом, проведенные исследования показали эффективность применения оптического метода при моделировании концентраторов напряжений на примере задевания ротора турбомшины. Выявлены распределения термических напряжений объемного образца,

расшифрованы голографические интерферограммы и намечены пути снижения вероятности возникновения разрушительных трещин в глубине концентраторов напряжений. Исследования имеют практическое значения в области предельного состояния деталей турбомашин, в том числе имеющих различную пористость.

3.2 Расчет эффективности управления направленной колкой железобетонных конструкций и горных пород при реконструкции электростанций.

В настоящее время в Республике Казахстан начала осуществляется широкомасштабная реконструкция и модернизация электростанций, и, в первую очередь, их наиболее трудоемкой части – турбофундаментов [12,13]. В связи с этим нами проводятся целенаправленные разработки альтернативных способов разрушения турбофундаментов с учетом требований экологии, в том числе взрывные безразлетные методы [14-17], огневые [18] и криогенные [19].

Следует учитывать, что для города Алматы и его окрестностей необходимо учитывать сейсмичность района. Это предъявляет повышенные требования к наблюдениям за осадкой фундаментов и деформацией зданий и сооружений, что накладывает дополнительные требования к разрабатываемому оборудованию. Производство выборочных вскрытий, вырубки, уширений в турбофундаментах не должно ослаблять фундаментные плиты. Более того, объем крупных высокопрочных горных пород в турбофундаментах достигает до 30-35% от объема бетона [12,13].

При модернизации электростанций производят направленную колку железобетонных конструкций. Должны быть исключены возникновение и развитие трещин в оставшемся под новое оборудование турбофундаменте.

В современной технологии раскалывания турбофундаментов с помощью взрывчатой веществ нельзя обеспечить прямолинейность плоскости раскола. Это связано с тем, что отраженная волна от продольной плоскости обнажения воздействует на трещину, которая отклоняется в сторону действия отраженной волны [20, с.9].

Для управления направлением распространения трещиной нами разработано устройство, для направленной колки, которое содержит емкость, заполненную жидкостью (водой или рассолом). Противоположную стенку емкости выполняют из листового металла и внутри оребряют. Оребренная жесткая стенка значительную часть отраженной волны рассеивает. Отражение и преломление волн происходит на границе контакта блоков, обладающих существенно различными акустическими свойствами.

Рассчитываем коэффициенты отражения K_3 , упругих волн для некоторых типов горных пород, контактирующих с водой, льдом и бетоном по методике [21, с.93]:

$$K_3 = \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2, \quad (3.1)$$

где z_1, z_2 – акустическое сопротивление горной породы и воды, льда или бетона соответственно;

$$z = \rho \cdot c; \quad (3.2)$$

где ρ - плотность, c – скорость звука в среде.

Для границы известняк-вода величина $K_3 = 45\%$ Приняты: $\rho_{изв.} = 2530 \text{ кг/м}^3$; $c_{изв.} = 3000 \text{ м/с}$; $\rho_{вод} = 1000 \text{ кг/м}^3$; $c_{вод} = 1485 \text{ м/с}$; $z_1 = 7,6 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$; $z_2 = 1,48 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$.

Таким образом, от границы известняк-вода отразится 45% энергии упругой волны.

Аналогичные расчеты для некоторых других типов пород, контактирующих с водой, льдом и бетоном, сведем в таблицу 3.1.

Таблица 3.1. Расчетные величины K_3 , %.

Горная порода	K_3 , %		
	вода	лед	бетон
Известняк	45	19,7	0,14
Мрамор	62	38,6	0,08
Гранит	64	41	2,1÷0,08

Наиболее благоприятный раскол массива(блоков), как видно из таблицы 3.1, будет происходить при контакте (через пасту, например, глину) горной породы с бетонной плитой, поскольку акустические свойства их близки с бетоном. Поэтому для раскола бетонных конструкций наблюдается близкая аналогия с крепчайшими горными породами.

Нами проведены опыты по изучению явлений и процессов, протекающих в средах с высокой акустической жесткостью под воздействием взрывных волн[14-17]. На фотографиях рис. 3.6 показаны голографические интерферограммы распространения фронта отраженной от стенок концентратора волны напряжения в массиве. Хорошо видно, что отраженная волна распространяется в соответствии с геометрическими и физическими законами акустики.

В силу близости значений волновых сопротивлений массива и среды устройства для направленной колки, основная часть энергии взрывной волны (несущей волны импульса), зависящей от коэффициентов отражения и преломления(см. рис.3.6), перейдет в среду устройства для направленной колки и будет отражена от дна и ребер, поверхности которых непараллельны поверхности обнажения массива, при этом взрывная волна, несущая весь сложный спектр побочных волн, будучи соизмерима с размерами ребер, рассеется за счет отражения в разные стороны под углами, по отношению к обнаженной поверхности массива, полного внутреннего отражения, и тем самым взрывная волна, раздробленная и повернута в результате отражения от ребер устройства, будет рассеяна, и окажется не способной вернуться в массив.

К тому же устройство, для направленной колки значительно удлиняет путь до плоскости отражения и рассеивания и возвращения в массив, так что отраженная волна «опоздает» встретить развивающуюся трещину. Важна не значительная продолжительность фазы сжатия, а момент встречи устья трещины с фронтом отраженной волны. В то же время,

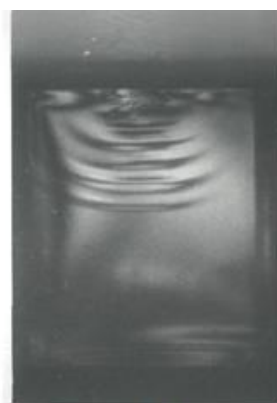
продолжительность импульса очень коротка, чтобы произвести отброс прижатого устройства для направленной колки от свободной поверхности массива, т.к. силы инерции огромны, а процесс происходит со скоростью звука. Взрывная волна не может получить информацию о состоянии среды перед ее фронтом, т.к. ее скорость определяется упругими свойствами среды(акустическими) и реакция среды всегда значительно запаздывает (см. рис. 3.6).

Таким образом, устройство для направленной колки обеспечивает задачи вывода взрывной волны из массива и ее рассеивания.

Эффективное управление волновыми процессами возможно, если геометрические параметры среды и устройства для направленной колки будут не менее $1/4 \lambda$ [21]. Это практический предел разрешения. Разрешение системы в случае когерентных волн(при взрыве образуются всегда когерентные волны) будет несколько меньше $1/4 \lambda$. Значит геометрические размеры системы (блок, граница раздела, устройство для преломления и рассеивания энергии волн напряжения) должны быть $0,125 \div 0,25 \text{ м}$. Такие требования вполне удовлетворяются в рассматриваемом устройстве. Поэтому, если учесть, что ребра будут размером в $15 \div 20 \text{ см}$, то рассеивание такой ребренной поверхности будет весьма эффективным.



а) $\tau_3 = 65 \cdot 10^{-6} \text{ с}$



б) $\tau_3 = 70 \cdot 10^{-6} \text{ с}$



в) $\tau_3 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ с}$

Рис. 3.6. Голографические интерферограммы распространения сфокусированной волны напряжения в кубе модели, имитирующей массив бетонной конструкции, с различными временными задержками τ_3 .

При динамическом нагружении блока импульсными нагрузками скорость развития трещины составляет $V_R = (0,34 \div 0,51) \cdot V_P$. V_P от скорости продольной взрывной волны (V_P), т.е. скорость развития трещины в $2 \div 3$ раза меньше скорости распространения взрывной волны.

Рассмотрим линию наименьшего сопротивления (л.н.с.), представляющую собой как кратчайшее расстояние от центра ВВ до открытой поверхности, обозначенную на рис.3.7 w. Пусть расстояние между шпурами равно $0,5$ л.н.с.[24, с. 243-244]. Тогда трещина должна преодолеть путь до выхода на поверхность обнажения равным 1 л.н.с., а отраженная волна, чтобы достичь той же точки (линии) на поверхности обнажения – $2,24$ (из геометрического построения). На скорость распространения взрывной волны (волны напряжения) V_P в $2 \div 3$ раза выше скорости роста трещины V_R . Следовательно, отраженная волна в большинстве случаев будет достигать устья развивающейся трещины и оказывать свое вредное воздействие.

Дальнейшее сближение шпуров между собой и приближение холостого шпура (тем более взрываемого шпура) к поперечной плоскости обнажения может привести к откольным явлениям и более значительной порче откалываемого блока в сравнении с обычным искривлением раскола на выходе трещины[25,26].

Определим точку встречи трещины и отраженной волны (рис.3.7).

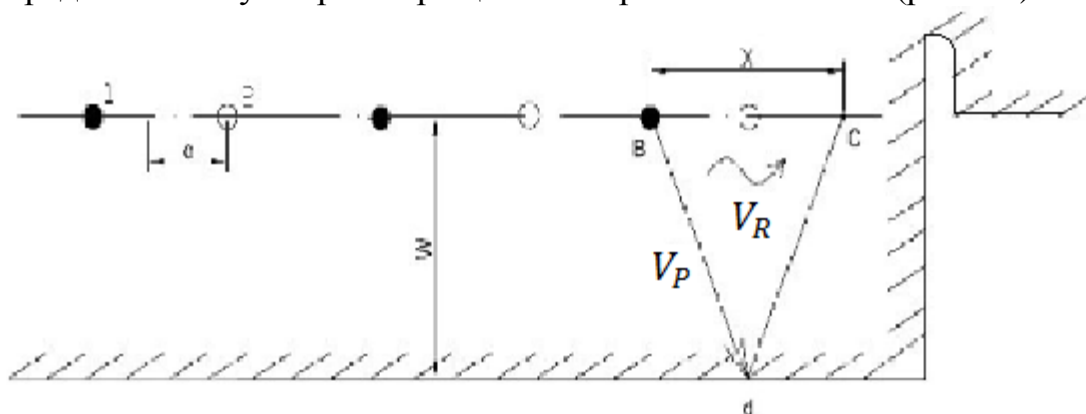


Рис. 3.7. К определению точки встречи трещины и отраженной волны: 1,2- заряженный и холостой шпуры.

Принимаем расстояние между шпурами $a=(0,8 \div 1)w$. Пусть x – путь пробега трещины; S_p – путь пробега взрывной волны (в dc); t_R – время прохождения пути трещиной x ; t_p - время прохождения взрывной волны до встречи с устьем трещины в точке C ($t_R = t_p$).

Из рис. 3.7 имеем:

$$\frac{x}{V_R} = \frac{2\sqrt{w^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2}}{V_P}.$$

(3.3)

При $V_R = k \cdot V_P$, где $k = 0,34 \div 0,51$, встреча произойдет на пути

$$x = \frac{2 \cdot k \cdot w}{\sqrt{1 - k^2}},$$

(3.4)

где $k = 0,34 \div 0,51$. Тогда

$$x = (0,735 \div 1,17) \cdot w.$$

(3.5)

Если x принять равным $2a$, то расстояние между шпурами и отстояние крайнего холостого шпура от поперечной плоскости должно быть меньше $(0,37 \div 0,58)w$, чтобы не произошла встреча трещины с отраженной взрывной волной. Для того, чтобы гарантировать исключение такой встречи, следует расстояние a принимать меньше $0,34 \cdot w$

Следовательно, на практике при традиционных способах колки практически всегда будут иметь место встреча трещины с отраженной взрывной волной и искривление трещины на выходе в сторону продольной плоскости обнажения. Поэтому потребовалась разработка устройства для направленной колки.

Таким образом, предложенная нами направленная колка конструкций, состоящих из искусственных и естественных минеральных сред, позволяет повысить качество производимых работ, сократить объем буровых работ и снизить затраты за счет увеличения расстояния между шпурами. Устройство для направленной колки позволяет управлять направлением распространения трещиной, что показано теоретически и подтверждено на моделях с помощью импульсной голографической установки. Ослабление влияния отраженной волны на направление распространения трещины составляет два или более раз.

3.3 Возможное отклонение трещины в турбофундаментах и крепких горных породах при реконструкции электростанций.

Реконструкция и модернизация турбофундаментов электростанций требуют проведения буровзрывных работ. Необходимо осуществлять сверление, проходку, зачистку, бороздование, резку, вырубку, уширение, бурение и, наконец, откалывание частей конструкций от турбофундамента (массива) [12,13].

Для этих целей нами проводятся целенаправленные многочисленные исследования различных способов и конструкций приборов и агрегатов, включая безразлетный взрыв[17], использование высокотемпературной сверхзвуковой струи горелки ракетного типа[18], криогенный пористый прибор разрушения[19].

В то же время сейчас широко используются традиционные буровзрывные работы. С их помощью восстанавливают (модернизируют) разрушенные турбофундаменты для установки турбогенераторов новых конструкций. Реконструируют верхнюю часть турбофундамента для установки турбомашин нового поколения с большей мощностью. Нарращивают на нижнюю часть турбофундаментов новую верхнюю конструкцию.

При раскалывании монолита существующими методами нельзя обеспечить прямолинейность линии раскола, поскольку на формирование направления распространения трещины решающую роль играют волны, отраженные от плоскостей обнажения.

В предлагаемом методе раскола направленного разрушения монолита во время взрыва создают дополнительную симметричную отраженную волну на участках возможного искривления развивающейся трещины раскалывания. Это реализуется путем предварительного бурения дополнительных шпуров на каждом участке. Полости этих шпуров размещают на биссектрисах углов падения и отражения детонационных волн от продольной плоскости обнажения.

Упомянутые углы проходят посередине между последними парами шпуров и последним шпуром, лежащим на линии намеченного раскола, и поперечной плоскостью обнажения.

Данные углы также удалены от плоскости намеченного раскола на расстоянии, равном удалению последней от продольной плоскости обнажения, образуя симметричный ей акустический экран.

Рассмотрим физико-математическую модель фронта модулирующей ударной волны η (рисунок 3.8). Считаем, что поверхность разрыва в общем случае может быть наклонена под углом γ к нормали ударной волны.

Определим возможное отклонение трещины при ударном сжатии и растяжении.

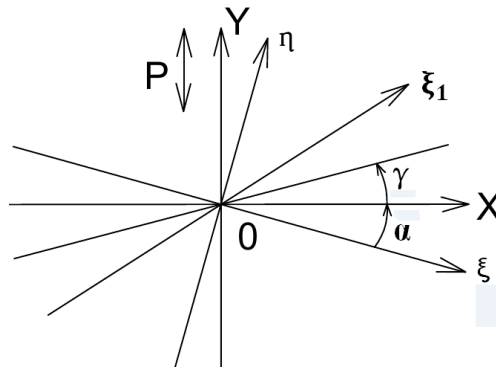


Рисунок 3.8. Система координат для определения возможного отклонения трещины при ударном сжатии и растяжении: P – внешнее растягивающее напряжение; η – фронт модулирующей волны; ξ – нормаль к η ; α – угол для продольной волны; γ – угол наклона поверхности разрыва (трещины); ξ_1 – направление ударной волны, организованное преднамеренно согласно способу направленной колки массива (турбофундамента), симметричное ξ .

Внешнее растягивающее напряжение P действует в направлении Y . Нормаль к фронту модулирующей волны η направлена по ξ . Угол α образован между X и ξ для продольной волны. Угол γ характеризует наклон поверхности разрыва. Углы α и γ считаем положительными.

Угол γ при ударном сжатии, определяющий положение главной оси тензора относительно осей X и Y , дается выражением [20, с.10]

$$\tan 2\gamma = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} = \frac{-\sigma_D \frac{1-2\mu}{1-\mu} \sin 2\alpha}{P + \sigma_D \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cos 2\alpha}. \quad (3.6)$$

Отсюда при слабом сжимающем ударе ($\sigma_D \ll P$) получаем

$$\gamma = -\frac{\sigma_D}{2P} \cdot \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \sin 2\alpha, \quad (3.7)$$

где σ_D – напряжение сжатия; τ, σ – касательные и нормальные напряжения.

Это значит, что поверхность разрыва будет в общем случае отклоняться, приближаясь к направлению отжимающего удара. В случае слабых ударных волн изменение направление трещины, как видно из (3.7), пропорционально σ_D/p .

При отклонении трещины под действием растягивающего удара σ_z остаются в силе формулы (3.6) и (3.7) с тем лишь различием, что вместо σ_D нужно подставить $\sigma_z > 0$.

При слабом растягивающем ударе ($\sigma_z \ll p$) получаем

$$\gamma = \frac{\sigma_z}{2p} \cdot \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \sin 2\alpha, \quad (3.8)$$

где μ – коэффициент поперечного сжатия.

В случае сильного удара, когда

$$|\sigma_z \cdot \cos 2\alpha| \gg p, \text{ получим} \quad \tan 2\gamma = -\tan 2\alpha. \quad (3.9)$$

В случае растягивающего удара из равенства (3.9) следует, что $\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha$.

При очень сильном ударе, следовательно, поверхность разрыва образует прямой угол с направлением удара ξ . При более слабых ударах ее поворот будет происходить в соответствии с формулой (3.8). В случае слабых ударных волн, как видно из (3.8) и (3.9), зависимость между изменением направления трещины и углом α упростится. В частности, никакого отклонения не будет при $\alpha = 0$ и $\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$. Оптимального отклонения можно ожидать при $\alpha = \pm \frac{\pi}{4}$.

Организуя ударную волну, симметричную ξ , действующую вдоль ξ_1 , и складывая ее с волной, действующей вдоль ξ , по существу угол α всегда будет равен 0 ($\alpha=0$). Поэтому отклонения трещины (плоскости разрыва) не будет.

Для подтверждения разработанной модели по определению возможного отклонения поверхности разрыва (трещины) проведены экспериментальные исследования на блоках (массиве) из оргстекла на импульсной голографической установке УИГ-1М.

Нами проведены опыты по изучению явлений и процессов, протекающих в средах с высокой акустической жесткостью под давлением взрывных волн [14,15,16,27,28,29]. На фотографиях (рисунок 3.9 и рисунок 3.10) показаны голографические интерферограммы, где хорошо видно излучение зарядного устройства (рисунок 3.9), отражение от стенок концентраторов, концентрация во втором фокусе эллипсоида (рисунок 3.10) энергии взрывной волны, ее отражение акустическим экраном, выполненного в виде серии «шпуров» с пористыми вставками.

На фотографии рисунка 3.9 видно, как экран (отражатель) из трех отверстий «разорвал» фронт цилиндрической волны. Это произошло за счет отражения энергии волны на участке расположения трех отверстий: со стороны источника взрыва – зарядной камеры (на фотографиях -

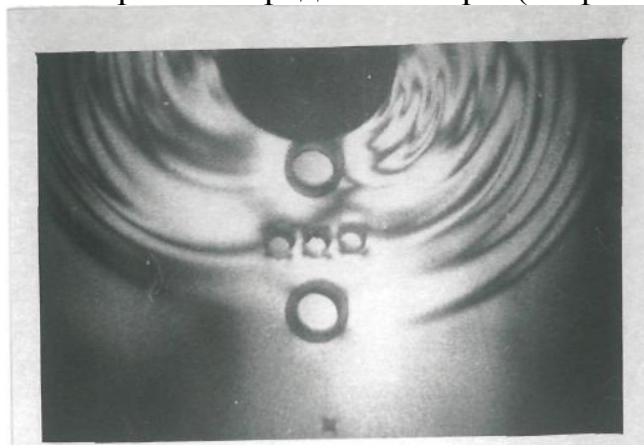


Рисунок 3.9. Разрыв прямой взрывной волны (волны напряжения) при переходе через экран из трех шпуров с пористыми вставками, имитирующий массив турбофундамента. Время задержки импульса $\tau_3 = 45,8 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

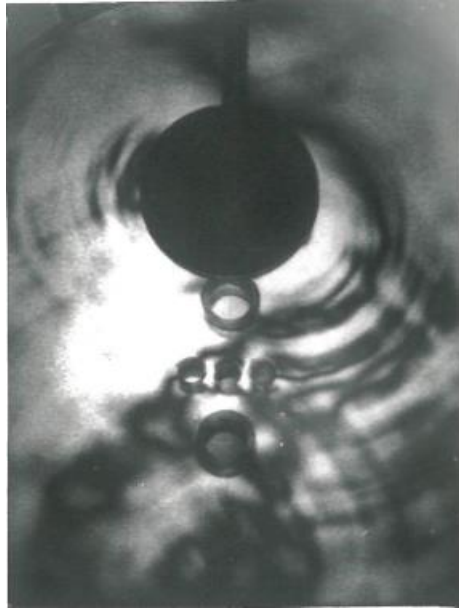


Рисунок 3.10. Иллюстрация эффективности экрана из трех шпуров с пористыми вставками, демонстрирующая отражение волны от стенок концентраторов, концентрация во втором фокусе эллипсоида энергии взрывной волны (волны напряжения). Имитация массива турбофундамента. Время задержки импульса $\tau_3 = 160 \cdot 10^{-6} \text{с}$.

темный круг) каждое отверстие окаймлено темными полудугами, и между малыми отверстиями и большими – темные полосы – это фронты отраженных волн. Видно, как устраняется влияние основного фактора, влияющего на искривление трещины и обеспечивается образование симметричной волны отражения относительно продольной свободной поверхности.

На фотографии рисунка 3.10 наблюдается аналогичная картина. Здесь имеют место остаточные явления, которые убеждают что отраженная волна была мощной. Шпуры способны отразить прямую волну напряжения в сторону устья трещины и оказать полезное действие на сохранение направления ее развития, т.е. выхода к краю блока практически по прямой. Диаметр отверстий экранов всего $5,5 \cdot 10^{-3} \text{м}$, а длина волны - $6 \cdot 10^{-2} \text{м}$, т.е. более, чем в 10 раз превышает диаметр шпура.

Интересно отметить, что фронт отраженной волны – цилиндрический. Это хорошо видно на интерферограмме, снятой с большой временной задержкой (рисунок 3.10). Отчетливо видна зона максимальных напряжений, расположенная в модели в области второго фокуса, т.е. подтверждается факт фокусировки отраженной волны. Благодаря упругим свойствам материала модели, начинается процесс излучения, т.е. второй фокус сам становится источником волны напряжения. Это подтверждается наличием интерференционных полос на рисунке 3.10.

Из рисунков 3.9 и 3.10 также видно, что интерферограммы хорошо иллюстрируют эффективность акустического экрана: в зонах вторых фокусов (за экранами) нигде нет «следов» прямых волн.

Таким образом, управление трещинами в искусственных и естественных минеральных средах позволяет повысить качества буровзрывных работ, исключить вредное влияние трещин, развивающихся от отраженных волн. Способ позволяет исключить возникновение и развитие трещин. Показано на голографических интерферограммах, полученных на импульсной установке, что отраженная волна управляема и не влияет на развитие трещины в случае разрыва поверхности монолита. Теоретическая модель также подтверждает, что возможное (ожидаемое) отклонение трещины при ударном сжатии и растяжении не происходит.

3.4 Управление трещинами в железобетонных конструкциях и горных породах при реконструкции электростанции.

Восстановление и реконструкция фундаментов электростанций требует значительных объемов работ, например, при вырубке и подбетонке элементов, уширении ригелей или продольных балок.

Для полного удаления верхней части фундамента приходится делать новые выпуски для связи со старой частью. Новые выпуски закладываются в нижнюю часть в отверстия, которые образуют путем бурения.

При уравнивании (центрировании) новой (верхней) и старой (нижней) частей фундаментных плит приходится откалывать взрывом или обрезать специальными пилами излишнюю часть нижней плиты [12,13].

Для выполнения различных видов работ по разрушению, сверлению, проходке, зачистке, бороздованию, резке, вырубке, уширению, бурению искусственных (бетон, железобетон, арматура) и естественных (горные породы) минеральных сред нами разработаны различные приборы: взрывные безразлетные, огневые и пористые криогенные [17-19].

Буровзрывные работы проводят при восстановлении разрушенных фундаментов в прежних габаритах для установки турбины прежнего типа; для приспособления верхней части турбофундамента для установки машины нового типа; при сооружении на существующей нижней части фундамента новой верхней части.

Установка новых турбин на старые фундаменты на тепловых электростанциях требует производить отделение части конструкций от массива фундамента. Для этих целей применяют раскалывание монолита, включая бурение шнуров по линии намеченного раскола, размещают заряды взрывчатого вещества (ВВ) и одновременно их взрывают.

Однако при таком разрушении нельзя обеспечить прямолинейность линии раскола по той причине, что на формирование направления распространения трещины решающую роль играют волны, отраженные от плоскостей обнажения. Как правило, отклонение трещины происходит в сторону плоскости обнажения. Если же имеются две плоскости обнажения, симметричные линии раскола, то такого отклонения трещин не происходят, распространение трещины всегда прямолинейно [20].

Также применяют заполнение шпуров жидкостью, как полностью, так и частично. Шпуры, заполненные жидкостью частично, служат для размещения в них заряда ВВ. Однако, при этом не удастся получить прямолинейного развития трещины, она на выходе из массива неизбежно поворачивает в сторону плоскости обнажения.

Для повышения качества раскола и упрощения технологии направленного разрушения монолита предлагается во время взрыва создать дополнительную симметричную отраженную волну на участках возможного искривления развивающейся трещины раскалывания путем предварительного бурения дополнительных шпуров (не менее двух подряд) на каждом участке. Это делается таким образом, что их полости

размещены на биссектрисах углов падения и отражения взрывных волн от продольной плоскости обнажения. Эти углы проходят посередине между последними парами шпуров и последним шпуром, лежащим на линии намеченного раскола, и поперечной плоскостью обнажения. Данные углы также удалены от плоскости намеченного раскола на расстоянии, равном удалению последней от продольной плоскости обнажения, образуя симметричный ей акустический экран.

В массиве разрушаемой конструкции 1 по линии намеченного раскола бурят шпуры 2-6, часть из которых, например, 3 и 5, служат для размещения зарядов ВВ, а остальные выполняют функции концентраторов напряжений (рисунок 3.11).

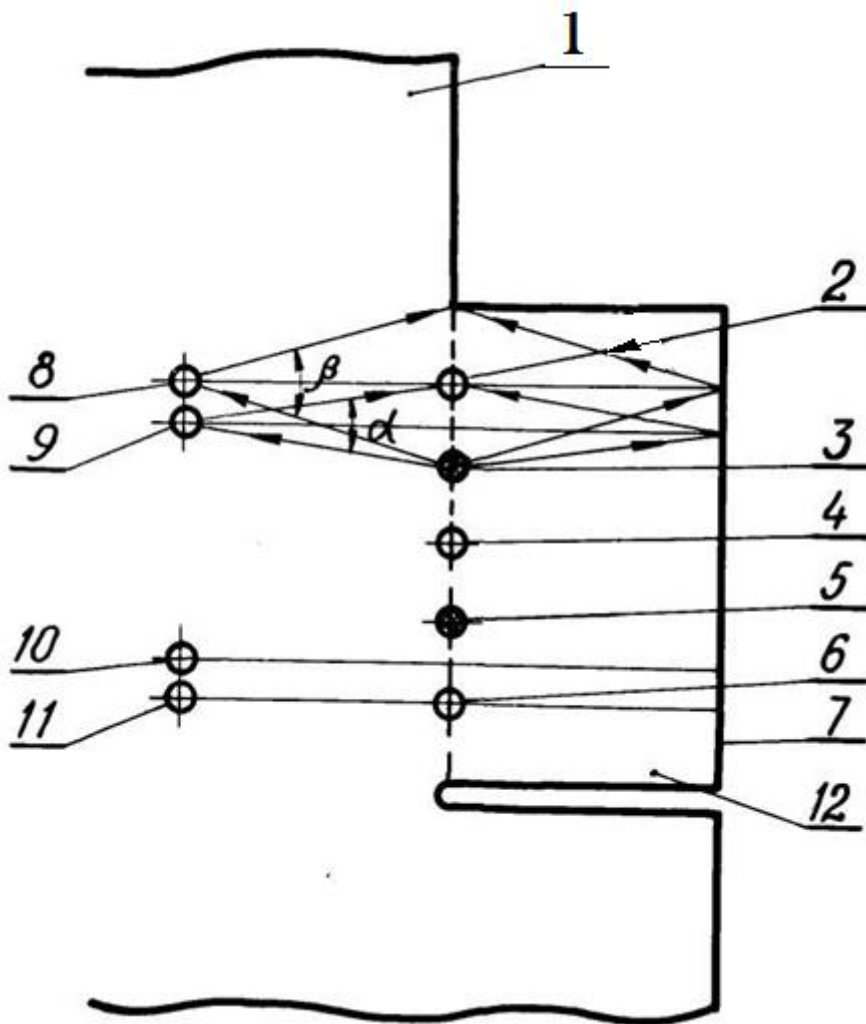


Рисунок 3.11 Схема управления направлением распространения трещиной.

Кроме того, в массиве симметрично обнаженной поверхности 7, бурят шпуры, например, 8 и 9, таким образом, чтобы биссектриса угла α делила пополам отрезок между шпурами 2 и 3, а биссектриса угла β проходила через шпур 2. Аналогичным образом выбирают место для шпуров 10 и 11. При одновременном взрывании зарядов ВВ в шпурах 3 и 5 от границы «заряд-фундамент» в массив 1 и откалываемый блок 12 расходятся волны

напряжения (на рис.3.11 они показаны стрелками). Благодаря зеркальной симметрии волн, отраженных от плоскости обнажения 7 и плоскостей шпуров 8, 9 и 10,11, отклонения развивающейся трещины на выходе не происходит. Этим обеспечивается прямолинейность плоскости раскола. Шпуры 8,9 и 10,11 в дальнейшем используются аналогичным образом при отбойке следующего ряда блоков.

Оценка возможного отклонения трещины при ударном сжатии и растяжении показывает[20,21], что если организовать ударную волну, симметричную падающей, то при их сложении угол между плоскостью раскола и падающей волной будет равен нулю, т.е. отклонение трещины не произойдет. Для предложенной технологии потребуются дополнительные исследования такой модели.

Возникает вопрос, какой тип волны при взрыве ВВ и соответствующий ему вид напряжения участвует при расколе блока. В непосредственной близости от источника взрыва возникает ударная волна. Она развивается с пиковым нарастанием давления на расстоянии от 0,3 до 0,5 радиусов заряда и переходит во взрывную волну или в волну напряжения сжатия. Величиной 10-12-тью радиусами заряда ограничена зона упругопластического действия взрыва, а на расстояниях до 100-120-тью радиусов заряда от центра взрыва амплитуда фазы сжатия волны значительно больше фазы растяжения.

На расстоянии около 450-500 радиусов заряда от центра взрыва амплитуда фазы сжатия равна амплитуде фазы растяжения, т.е. волна напряжения полностью перерождается в синусоидальную. При этом постоянно растет длина волны[21, с. 179-181].

Практически считают, что взрывная волна с пиковым нарастанием распространяется до 120-150-ти радиусов заряда, после чего начинается область сейсмических колебаний, т.е. от звуковых до собственно сейсмических.

Для оценки длины волны λ в крепких породах, при которой происходит процесс откалывания блока, примем скорость волны напряжения 5000 м/с, продолжительность взрыва (пикового нарастания и спада давления) - $100 \div 200$ мкс при диаметре шпура $30 \div 40$ мм. Тогда длина волны будет не более $2 \cdot 5000 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 2$ м. Толщину откалывания блоков при этом принимают 3 м.

Для раскалывания блоков с шириной $0,2 \div 0,5$ м длина волны напряжений уменьшится до $2 \cdot 5000 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 1$ м[21, с.38].

Поскольку практически при пиковых нагрузках учитывают только 1/3 продолжительности полуволны максимального значения амплитуды (средний участок), т.к. 80÷90% энергии заключается в этой части, а это означает, что длина волны, имеющая практический смысл для раскола блока, будет значительно меньше расчетной и составит не более $0,5 \div 1$ м.

Экспериментальные исследования проводились на моделях из оргстекла на импульсной голографической установке[14-16,27-29]. Такая среда была выбрана, поскольку она обладает высокой акустической жесткостью.

Голографические интерферограммы засвидетельствовали весь путь ударной волны: трансформацию ее во взрывную волну (волну напряжения сжатия), отражение волны от стенок концентратора, трансформацию волны в волну растяжения, фокусировку энергии, отражение энергии акустическим экраном. Визуально установлено устранение влияния основного фактора, влияющего на искривление трещины раскалываемого блока, и образование симметричной волны отражения относительно продольной свободной поверхности.

Акустические экраны, выполненные в виде трех шпуров с пористыми вставками, отразили прямую волну напряжения в сторону устья трещины, сохранив полезное направление ее развития практически по прямой линии, причем длина волны более, чем в 10 раз, превышала диаметр шпура.

Таким образом, для восстановления и реконструкции турбофундаментов электростанций разработан способ раскола блока с управляемым направлением распространения трещины. Это достигнуто за счет управления волной, отраженной от плоскостей обнажения. Во время взрыва создается дополнительная симметричная отраженная волна на участках возможного искривления развивающейся трещины, образуя симметричный акустический экран.

Заключение

В диссертационной работе исследованы концентраторы напряжений в роторах и статорах турбин путем физического моделирования канавок с помощью оптико-поляризационного метода (метода фотоупругости). В ходе выполнения диссертационной работы были выполнены следующие задачи: 1) Была разработана модель канавчатого концентратора турбины (термокомпенсационной канавки) в масштабе 10:1; 2) Были получены интерферограммы напряжений для турбинной канавки с помощью оптико-поляризационного метода; 3) Были расшифрованы интерферограммы напряжений для сжатия и растяжения; 4) Были разработаны принципы конструирования турбинных канавок с целью увеличения маневренности турбины; 5) Была дана оценка величинам напряжений и критическим размерам усталостных трещин.

Произведен необходимый обзор работ по концентраторам напряжений в турбинах электростанций. Для изучения термоупругих напряжений в канавках, имитирующих концентраторы напряжений ротора турбины, использовался метод физического моделирования с помощью метода фотоупругости. С помощью интерференционных картин наблюдались процессы развития термонапряжений в моделях из оптически чувствительных материалов.

Для снижения вероятности возникновения разрушительных трещин в глубине блока канавки должны иметь меньшую ширину по сравнению с глубиной. Проведенные авторами исследования показали эффективность оптических методов для трех различных задач: по выявлению механизма процесса парообразования в пористой структуре, распределения термических напряжений пористого материала и пористой структуры, выполненной в виде канавки [5]; для огнеструйной пассивировки боков горных пород [4] и для канавок турбины они выявили возможность расшифровки интерферограмм и наметили пути снижения вероятности возникновения разрушительных трещин в глубине блока и канавки, а также принципы конструирования различных концентраторов напряжения в турбомашинах. Исследования имеют практическое значение в областях нормального режима эксплуатации турбин, так и для предельного состояния материала, возникшего при переходных режимах (пуск и останов турбомашин). Произведенное авторами исследование по характеру распределения термических напряжений вполне согласуется с картиной распределения трещин в зоне замковых соединений и шипов рабочих лопаток, имеющих канавчатую форму ([2], с. 180); в местах тепловых канавок роторов и в выточках канавчатой формы передних концевых уплотнений и в области преддисконной галтели дисков регулирующих ступеней ([1], с.388). Поэтому выявление даже самых мелких трещин, величина раскрытия которых измеряется несколькими микронами $(8 \cdot 10) \cdot 10^{-6}$ м, позволит избежать крупных аварий.

Авторами были приведены экспериментальные данные по теплообмену в зоне критического сечения сопла Лавалья, выполненного традиционно с приливом, предсопловой галтелью, снабженных капиллярно-пористым покрытием. Опыты проводились авторами на горелке, выполненной по модели ТР-14/22-5 (прототип), работающей на кислородно-керосиновой смеси, и на горелке, в которой зона критического сечения сопла Лавалья оформлена конструктивно в виде прилива и предсопловой галтели, снабженных капиллярно-пористым покрытием. Таким образом, проведенные авторами исследования показали, что у сопла увеличивается срок службы за счет интенсификации теплопередачи, увеличения отводных тепловых нагрузок, выравнивания температурного поля в охлаждаемых стенках, повышения теплоаккумулирующей способности сопла и самоприспосабливающейся способности капиллярно-пористого покрытия, что особенно важно в момент возможных аварийных ситуаций. Компенсируются термические удлинения, снимаются концентрации термических напряжений, что исключает возникновение резкопеременных разрушающих нагрузок.

Также авторы пришли к выводу, что механизм разрушения металлов принципиально отличается от механизма разрушения пористых материалов. Ряд термомеханических свойств также различен. Несмотря на это, на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности при граничных условиях второго рода проведена аналогия в поведении материалов в предельном состоянии и выявлены зависимости тепловых потоков от времени их действия и глубины проникновения температурных возмущений, что позволяет предсказывать и предотвращать возникновение таких состояний для металлической поверхности и подбирать оптимальные тепловые нагрузки для пористых материалов.

Показана эффективность применения оптического метода при моделировании концентраторов напряжений на примере задевания ротора турбомшины. Выявлены распределения термических напряжений объемного образца, расшифрованы голографические интерферограммы и намечены пути снижения вероятности возникновения разрушительных трещин в глубине концентраторов напряжений. Исследования имеют практическое значения в области предельного состояния деталей турбомашин, в том числе имеющих различную пористость.

Исходя из исследования реконструкции турбофундамента электростанции было выявлено, что направленная колка конструкций, состоящих из искусственных и естественных минеральных сред, позволяет повысить качество производимых работ, сократить объем буровых работ и снизить затраты за счет увеличения расстояния между шпурами. Устройство для направленной колки позволяет управлять направлением распространения трещиной, что показано теоретически и подтверждено на моделях с помощью импульсной голографической установки. Ослабление влияния отраженной волны на направление распространения трещины составляет два или более раз.

Список использованной литературы

1. Трухний А.Д., Лосев С.М. «Стационарные паровые турбины» - М.: Энергоиздат, 1981-456с.
2. Молочек В.А. «Ремонт паровых турбин» - М.: Энергия, 1968-376с.
3. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы деформируемого тела. – М.: Наука, 1973. – 576с.
4. Генбач А.Н., Андрианов А.А., Копылец К.Н. Исследования поляризационно-оптическим методом условий огнеструйной пассивировки блоков горных пород. – В книге «Комплексные исследования физических свойств горных пород». – М.: МГИ, 1977 с. 45-46.
5. V.M. Polayev, A.N.Genbach, A.A.Genbach / An experimental study of thermal stress in porous materials by methods of holography and photoclasticity// Experimental thermal and fluid science, avenue of the Americas, New York, volum 5, number 6, November. – 1992.- p.697-702
6. Поляев В.М., Генбач А.А. Пористое охлаждение камер сгорания и сверхзвуковых сопел// Тяжелое машиностроение, №7. – 1991. – с. 8-10.
7. Генбач А.А., Генбач Н.А. Охлаждение камеры сгорания и сопла при вынужденном течении недогретого охладителя в пористых структурах// Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях/ Труды 5-ой Международной НТК, Алматы, АИЭС. – 2006. – С. 55-58.
8. Поляев В.М., Генбач А.Н., Генбач А.А. Предельное состояние поверхности при термическом воздействии // Теплофизика высоких температур. – 1991. Т. 29, №5. – с 923-934.
9. Генбач А.А., Бурмистров А.В. Исследование теплового состояния цилиндров паровых турбин // Промышленность Казахстана. – 2011. №2 (65). – с. 91-93
10. Поляев В.М., Генбач А.А., Пчелин А.Л. Термический способ разрушения материала // Вестник МГТУ. – 1992. Серия Машиностроение, №2 – с.104-110
11. Островский Ю.Н., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. – М.: Наука, 1977
12. Методические указания по обследованию фундаментов турбоагрегатов: РД 34.21.323-95.- М.: ЦПТИ и ТО ОРГРЭС, 2006.
13. Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадкой фундаментов и деформациями зданий и сооружений строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций: СО 153-34.21.322. – М.: ЦПТИ Э и ТО ОРГРЭС, 2005.
14. Исследование распространения волн напряжений в твердом теле методом голографии/ Б.Р. Ракишев, А.Н.Генбач, А.А. Генбач и др.// Известия вузов, Горный журнал. – 1991. №4.-с.17-21.
15. К управлению энергией волн напряжений в твердых средах с помощью замкнутой щели/Б.Р. Ракишев, А.Н. Генбач, А.А. Генбач и др.// Известия вузов. Горный журнал. – 1991. №5 – с. 53-57.

16. Methods of Monitoring Energy Processes/ V. Polyayev, A. Genbach, A. Genbach// Experimental thermal and fluid science, International of Thermodynamics, Experimental Heat Transfer, and Fluid Mechanics, avenue of the Americas. – New York, volum 10, april, 1995. – p. 273-286.

17. Эллиптический прибор для модернизации и реконструкции турбофундаментов электростанций/ А.А. Генбач, И.Б. Бакытжанов// Промышленность Казахстана. – 2011. №4(67). – с. 76-78.

18. Терморреактивная горелка – эффективное средство интенсификации строительного производства/ А.А. Генбач, В.О. Байбекова// Поиск, МОН РК. – 2011. №4. – с. 179-184.

19. Криогенный пористый прибор для реконструкции фундаментов турбоагрегатов/ А.А. Генбач, Б. Азимханов// Промышленность Казахстана. – 2011. №5(68). – с. 85-88.

20. Физика быстропротекающих процессов/ под ред. Н.А. Златина. Т 2. – М.: Мир, 1971.

21. Ржевский В.В., Новик Т.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978.

22. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. – М.: Госгортехиздат, 1962.

23. Мосинец В.Н. Деформация горных пород взрывом. – Фрунзе: Илим, 1971.

24. Лангефоре У. и др. Современная техника взрывной отбойки горных пород. – М.: Недра, 1968.

25. Ханукаев А.Н. Физические процессы при отбойке гранитных пород взрывом. – М.: Недра, 1974.

26. Суханов А.Ф., Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. – М.: Недра, 1983.

27. Генбач А.А., Бакытжанов И.Б. Защита от землетрясений фундаментов ТЭС с помощью пористых геозкранов// Поиск. - №1(2). – 2012. – с. 289-297.

28. Генбач А.А., Бакытжанов И.Б. Термомеханический циклонный прибор для реконструкции и модернизации фундаментов турбогенераторов// Промышленность Казахстана. - №3(72). – 2012. – с. 71-73.

29. Генбач А.А., Касимов А.С. Огнеструйная горелка с пористой системой для реконструкции и модернизации фундаментов турбогенераторов// Поиск. - №3. – 2012. - с. 104-109.