

УДК 621.125

ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАМКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ЦИЛИНДРА СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ К-500-240

¹ И. А. Пальковigorpalkov@i.ua

ORCID: 0000-0002-4639-6595

² Н. Г. Шульженко,

д-р техн. наук

mklshulzhenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1386-0988

¹ Акционерное общество

«Турбоатом»,

61037, Украина, г. Харьков,

пр. Московский, 199

² Институт проблем

машиностроения

им. А. Н. Подгорного

НАН Украины,

61046, Украина, г. Харьков,

ул. Пожарского, 2/10

Исследуется влияние температурного поля на напряженное состояние элементов замкового соединения лопаток турбины, где наблюдались поломки. Соединение рабочих лопаток турбин при подводе тепла от парового потока находится в условиях неравномерного нагрева. При этом изменяются физико-механические свойства материалов и наблюдаются градиенты температуры, вызывающей неодинаковое тепловое расширение отдельных частей конструкции. Это приводит к температурным напряжениям, которые в сочетании с механическими напряжениями от внешних нагрузок могут вызвать существенную пластическую деформацию конструкции, породить трещины или повреждение конструкций. Для уточнения распределения напряжений по конструкции замкового соединения решается задача с учетом температурного поля. Решение задачи осуществляется в термоконтактной постановке с учетом влияния теплообмена на передачу усилий в замковом соединении. Задача контактного взаимодействия является существенно нелинейной, и связь температурной задачи с задачей механики осуществляется через заранее неизвестные граничные условия в контакте. Напряженное состояние и характер контактного взаимодействия зависят от температурного поля, что определяется условиями взаимодействия. Решение термоконтактной задачи в замковом соединении основано на применении модели контактного слоя. Зоны предполагаемого контактного взаимодействия представляются контактными элементами. Механическое взаимодействие поверхностей контакта определяется величиной их взаимного проникновения. Задача решается с использованием метода конечных элементов, общее число элементов - 371498. В рассматриваемой модели имеется несколько зон контактного взаимодействия: а именно, область соприкосновения штифтов с диском, а также с замковой лопаткой и призматическими лопатками; область соприкосновения опорных площадок хвоста призматической лопатки и хвостовика диска. В зонах контакта осуществляется сжатие сетки. Представлены результаты расчета в виде распределения температуры по замковому соединению. Показано, что имеет место перепад температуры по радиусу и ширине диска. Температура 533 °C со стороны входа пара падает до уровня 525 °C со стороны выхода пара. Приводятся результаты расчетной оценки напряженного состояния замкового соединения рабочих лопаток первой ступени цилиндра среднего давления паровой турбины, свидетельствующие о значительных напряжениях, способных вызывать пластическую деформацию.

Ключевые слова: турбина, замковое соединение, рабочая лопатка, напряженное состояние, контактное давление, температурное поле, жесткость контакта.

Введение

Обеспечение надежности замкового соединения рабочих лопаток турбины требует проведения исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) соединения, отвечающих условиям эксплуатации. Замковое соединение рабочих лопаток турбины испытывает значительные нагрузки при неравномерном по радиусу и непостоянном во времени распределении температур, что обуславливает необходимость анализа НДС при совместном влиянии указанных факторов.

Определение НДС данного замкового соединения уже рассматривалось в [1, 2]. Решение осуществлялось в упругой постановке без учета влияния температурных напряжений, при этом использовалась трехмерная конечно-элементная модель. В качестве нагрузки, определяющей напряженно-деформированное состояние в соединении, принимались центробежные усилия при вращении ротора вокруг оси с угловой скоростью 314,16 рад/с. В связи с симметрией системы рассматривался не весь диск с лопатками, а только его сектор с углом раствора $\varphi=20^\circ$, на торцах которого задавались

условия симметрии. Закрепление модели в осевом направлении осуществлялось с учетом перемещений, полученных ранее при расчете НДС целого ротора. Для этого на торцах диска со стороны входа и выхода пара задавались перемещения 0,128 мм и 0,16 мм соответственно.

Моделирование исследуемых объектов (рис. 1) проводилось в виде трехмерных тел в пакете геометрического моделирования Autodesk Inventor.

Расчетными исследованиями напряженного состояния ряда конечно-элементных моделей замкового соединения определен оптимальный размер конечного элемента (КЭ) равный 3 мм [3] из условия, что при дальнейшем уменьшении размера КЭ результаты расчета изменяются не более чем на 3%.

В результате определения НДС рассматриваемого замкового соединения установлено следующее [3]:

– в замковом соединении (рис. 1, а) имеются зоны повышенных радиальных напряжений у галтельных переходов опорных площадок и отверстий под штифты – напряжения близки к 540 МПа. При этом средний уровень напряжений в элементах соединения невысок и составляет около 80 МПа;

– наибольшие деформации испытывает диск в радиальном направлении под замковой лопаткой и сама лопатка – около 0,43 мм;

– распределение контактных давлений по опорным площадкам элементов соединения и призамковых лопаток является неравномерным;

– распределение контактных усилий по опорным площадкам призамковых лопаток отличаются от представленных в [4], где хвостовик лопатки рассматривался в рамках плоской деформации во взаимодействии с осесимметричным диском. Это можно объяснить учетом влияния замковой лопатки, а также решением задачи с использованием трехмерной модели соединения;

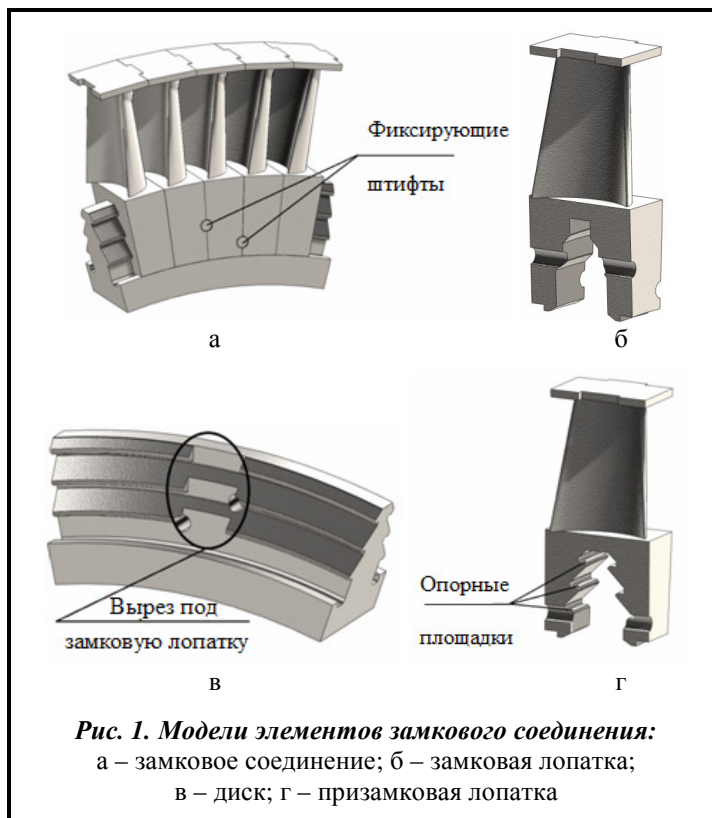
– максимальные напряжения имеют место в зоне наблюдавшихся повреждений после длительной эксплуатации данного типа конструкции замкового соединения.

Постановка задачи

Целью данной работы является определение НДС замкового соединения рабочих лопаток 1-й ступени среднего давления с учетом влияния теплообмена между элементами в соединении.

Для уточнения картины распределения напряжений по конструкции замкового соединения при решении задачи целесообразно учитывать температурное поле, поскольку в результате подвода тепла от парового потока соединение рабочих лопаток работает в условиях неравномерного нагрева. В таких условиях изменяются физико-механические свойства материалов и возникают градиенты температуры, сопровождающиеся неодинаковым тепловым расширением отдельных частей конструкции. Это вызывает температурные напряжения, которые сами по себе или в сочетании с механическими напряжениями от внешних нагрузок могут вызвать появление трещин и повреждение конструкций. В результате влияния температурных напряжений может возникнуть существенная пластическая деформация, ведущая к полному или прогрессирующему разрушению конструкции [5].

Учет влияния теплообмена на передачу усилий в замковом соединении корректно осуществлять в термодинамической постановке. В данном случае задача контактного взаимодействия является существенно нелинейной, поскольку взаимное влияние температурной и силовой составляющих де-



формаций осуществляется через заранее неизвестные граничные условия в контакте. НДС и характер контактного взаимодействия зависят от распределения температурных полей, а температурное поле – от контактного взаимодействия элементов [6].

Термоконтактная задача взаимодействия элементов в замковом соединении, решаемая в данной работе, основана на применении модели контактного слоя [6]. При этом зоны предполагаемого контактного взаимодействия моделируются с помощью контактных элементов. Механическое взаимодействие поверхностей контакта определяется величиной их взаимного проникновения. Одной из основных характеристик контактного слоя в данном случае является контактная жесткость C_n . Величина контактной жесткости должна быть достаточной для пренебрежения взаимным проникновением поверхностей, но таковой, чтобы точность системы уравнений конечно-элементной модели позволяла определить контактные напряжения

$$\sigma_p = C_p \cdot (u_p^1 - u_p^2 - \delta_p)$$

где u_p^1, u_p^2 – перемещения поверхностей в направлении общей нормали; δ_p – начальный зазор (натяг) между контактными поверхностями.

В данной работе величина контактной жесткости выбиралась в процессе решения исходя из того, что взаимное перемещение контактирующих поверхностей не превосходит величин их шероховатости.

Конструкция трехопорного грибовидного соединения, применяемая в рассматриваемом замковом соединении, подвергается в процессе сборки дополнительной закатке, что предотвращает наличие большого трения между взаимодействующими поверхностями. Исходя из этого трение при решении данной задачи не учитывается.

При решении термоконтактной задачи полагается, что на границе соприкосновения элементов замкового соединения имеет место идеальный тепловой контакт и выполняется равенство температур и тепловых потоков [6]

$$T_1(x_k, y_k, z_k, t) = T_2(x_k, y_k, z_k, t), \quad \lambda_1(dT/dn)_k = \lambda_2(dT/dn)_k$$

где $\lambda_1(T), \lambda_2(T)$ – коэффициенты теплопроводности контактирующих тел, зависящие от температуры T .

Задача теплопроводности при решении задачи термоконтактного взаимодействия элементов в замковом соединении предшествует задаче термомеханики. Значения контактных напряжений уточняются в процессе итерационного процесса. При создании сетки конечных элементов использовался двадцатиузловой *Solid226*. Данный элемент отличается от используемого ранее *Solid186* тем, что имеет степени свободы по перемещениям и температуре и позволяет получить решение совместной термоконтактной задачи (рис. 2).

При разбиении получена сетка из 371498 КЭ (рис. 3). Рассматриваемая КЭ модель имеет несколько зон контактного взаимодействия: область соприкосновения штифтов с диском, замковой лопаткой, призматическими лопатками; область соприкосновения опорных площадок хвоста призматической лопатки и хвостовика диска. В зонах контакта, главным образом влияющих на передачу усилий между взаимодействующими элементами, имеет место сгущение сетки с уменьшением размера КЭ до 1 мм, что повышает точность расчета.

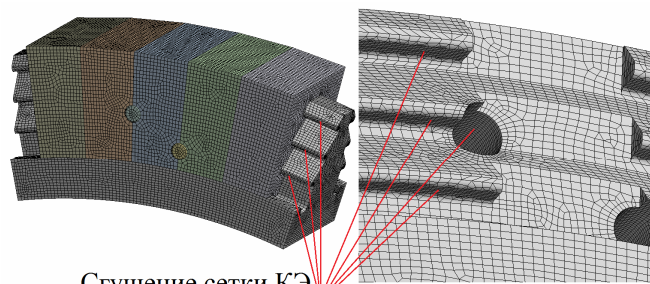
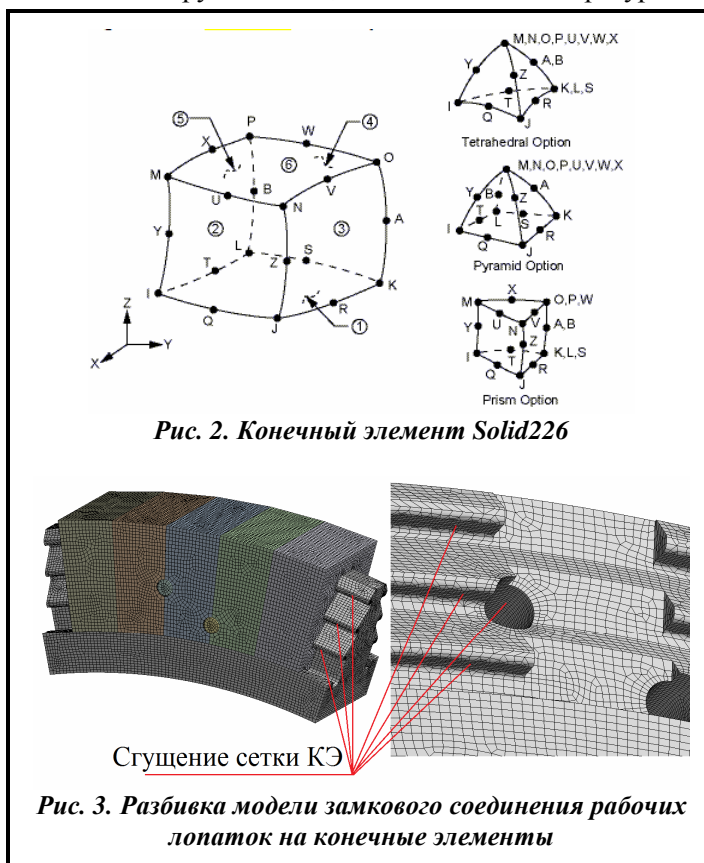


Рис. 3. Разбивка модели замкового соединения рабочих лопаток на конечные элементы

В качестве исходных данных из [7] взяты теплофизические свойства материалов замкового соединения. Перед и за ступенью задавалось распределение температуры в радиальном направлении – граничные условия первого рода.

Время расчета напряженного состояния составляло 4 часа.

Численный анализ термонапряженного состояния замкового соединения

На рис. 4 представлены результаты расчета в виде распределения температуры по замковому соединению.

При этом наблюдается перепад температуры как по радиусу, так и по ширине диска. Так, температура 533 °С со стороны входа пара падает до уровня 525 °С со стороны выхода пара.

В результате расчетных исследований получено распределение радиальных напряжений по замковому соединению (рис. 5).

Как следует из полученных результатов, распределение радиальных напряжений в рассматриваемой части диска имеет сложный пространственный характер. Зоны сжатия элементов зацепления в замковом соединении чередуются зонами растяжения по всей оставшейся области. При этом максимальный уровень сжимающих напряжений относительно невелик и достигает не более 50 МПа.

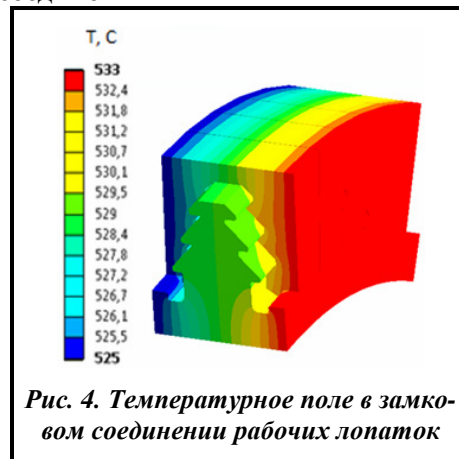


Рис. 4. Температурное поле в замковом соединении рабочих лопаток

Максимальный уровень растягивающих напряжений наблюдается у отверстий в диске под установку штифтов, фиксирующих замковую лопатку, и достигает 1787 МПа. Эквивалентные напряжения по Мизесу составляли в этой зоне около 2800 МПа, что свидетельствует о возможности появления пластических деформаций (рис. 6).

Из рисунка следует, что уровень предела текучести $\sigma_{0,2}$ для материала диска – сталь ЭИ-415 при рабочих температурах составляет около 450 МПа.

Максимальные значения напряжений, возникающих в местах передачи усилия от замковой лопатки на диск, постепенно снижаются при удалении от отверстий. В то же время превышение предела прочности и предела текучести материала при рассматриваемых температурах наблюдается по всему основанию рассматриваемой модели замкового соединения рабочих лопаток. В верхних сечениях рассматриваемой части диска уровень напряжений несколько ниже, однако по-прежнему значительный и достигает 550 МПа.

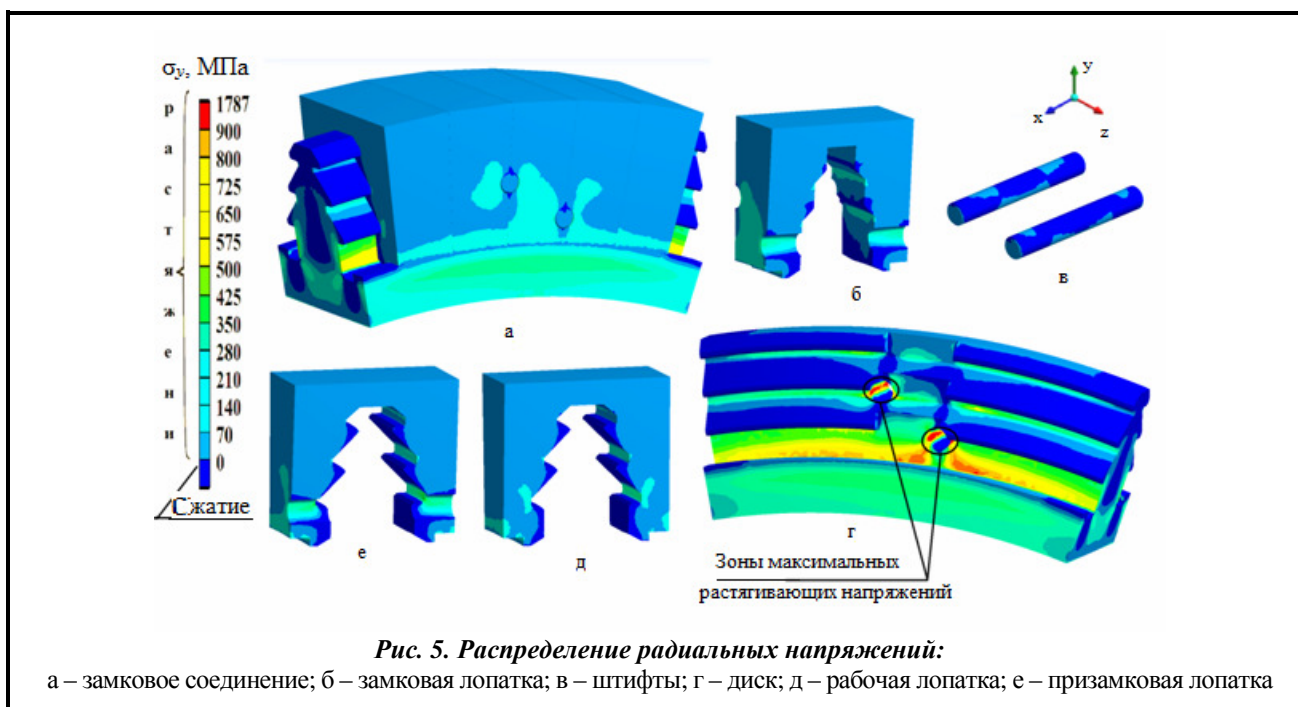


Рис. 5. Распределение радиальных напряжений:

а – замковое соединение; б – замковая лопатка; в – штифты; г – диск; д – рабочая лопатка; е – призматическая лопатка

Распределение радиальных напряжений по телу хвостов рабочих лопаток также не постоянно. Максимальные значения имеют место в районе галтельных переходов нижних опорных площадок хвостовиков, а также у отверстий под установку фиксирующих штифтов в призматических лопатках. При этом уровень напряжений значительно ниже уровня их в диске и достигает 350–400 МПа.

Наблюдается значительное повышение напряжений по сравнению с результатами, полученными ранее [2], что, вероятно, вызвано влиянием температурного поля. Так, в месте выреза в диске ротора под замковую лопатку имеются зоны максимальных растягивающих напряжений, величина которых значительно превосходит предел текучести, что, вероятно, приведет к возникновению пластических деформаций.

Появление дополнительных температурных напряжений в конструкции замкового соединения, видимо, связано с наличием элементов конструкции с различными коэффициентами температурного линейного расширения [7]. Так, наибольший по величине коэффициент температурного расширения имеет сплав ХН70ВМЮТ (штифты), а наименьший – сталь ЭИ-415 (диск). Происходящее при нагреве температурное расширение одних элементов в соединении превосходит по своей величине расширение других, что в итоге становится причиной появления дополнительных температурных напряжений.

Отмеченные ранее в [2] изгибные деформации хвоста лопатки в данном случае практически не проявляются.

На рис. 7 представлено распределение контактных давлений на опорных площадках лопаток в замковом соединении. При рассмотрении полученных результатов опорные площадки контакта пронумерованы следующим образом. Верхняя пара опорных площадок – 1-я пара, средняя – 2-я пара, нижняя – 3-я пара и боковые опорные поверхности хвоста – заплечики.

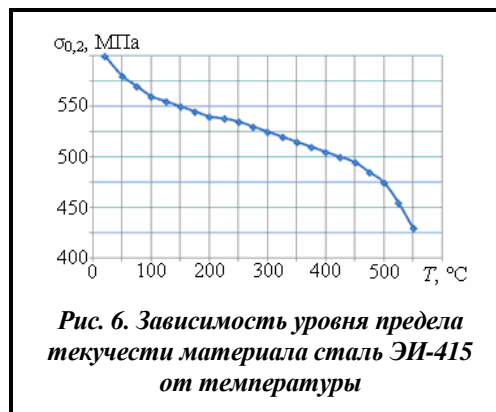


Рис. 6. Зависимость уровня предела текучести материала сталь ЭИ-415 от температуры

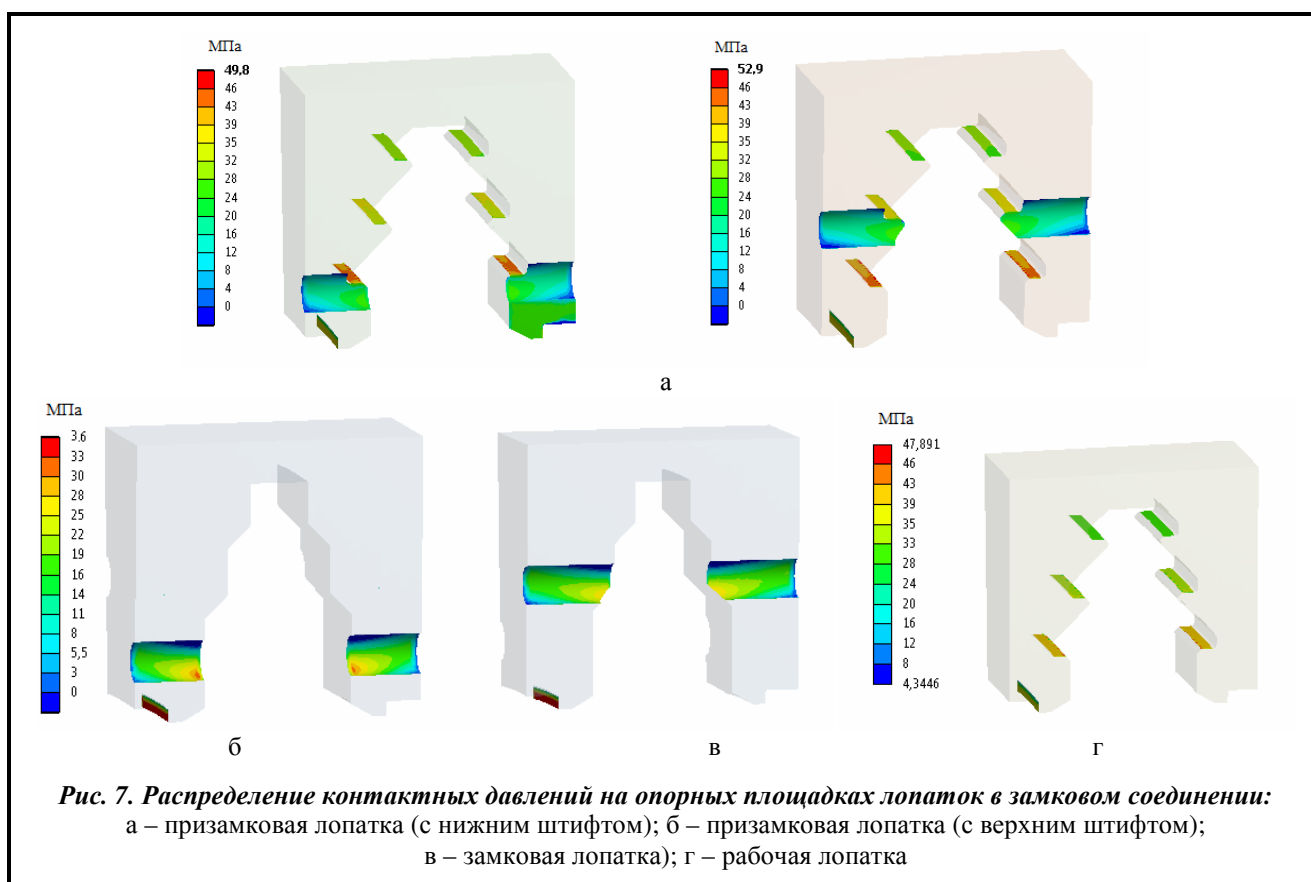


Рис. 7. Распределение контактных давлений на опорных площадках лопаток в замковом соединении: а – призматическая лопатка (с нижним штифтом); б – призматическая лопатка (с верхним штифтом); в – замковая лопатка; г – рабочая лопатка

Распределение контактных напряжений по опорным площадкам также носит сложный пространственный характер и зависит от положения лопатки в замковом соединении по отношению к замковой лопатке.

Представленные результаты распределения контактных давлений по опорным площадкам хвостов замковой и призамковых лопаток (рис. 6, а, б, в) позволяют оценить изменение характера контактного взаимодействия данных лопаток диском в соединении. Наибольший уровень контактных давлений наблюдается на 3-й паре опорных площадок призамковых лопаток. При этом максимум достигается со стороны отверстия под дополнительную штифтовку и главным образом зависит от положения штифта по высоте. Изменение контактных давлений на призамковой лопатке с нижним расположением штифта характеризуется относительным постоянством по 3-й паре площадок и выраженным градиентом по 2-й паре. При этом в распределении контактных давлений по площадкам хвоста призамковой лопатки с верхним расположением штифта наблюдается несколько иная картина. В данном случае 2-я опорная площадка расположена на одном уровне со штифтом, а распределение контактных давлений по ней можно охарактеризовать как постоянное. В то же время имеет место ярко выраженный градиент по уровню контактных давлений по 3-й нижней опорной площадке – от 39 до 52 МПа.

Из картины распределения контактных давлений по опорным площадкам хвоста крайних рабочих лопаток в замковом соединении (рис. 6, г) следует, что максимальный уровень наблюдается на нижних опорных площадках и является практически постоянным по длине площадки, достигая значений 42,45 МПа. На остальных опорных площадках рассматриваемого хвоста лопатки уровень напряжений ниже и достигает величин для 1-й пары – 25,59 МПа и для 2-й пары – 33,14 МПа. Характер распределения контактных усилий по указанным площадкам, как и по 3-й паре, является постоянным. В то же время изменение контактных усилий по заплечикам указывает на наличие градиента по высоте от 28 МПа – в верхней части площадки, до 39 МПа в нижней ее части.

В таблице представлены усредненные по площадке контакта значения давлений на опорных зонах рабочих лопаток в замковом соединении при учете и без учета влияния температурного воздействия.

Результаты распределения контактных давлений по опорным площадкам лопаток в замковом соединении (рис. 6, таблица) свидетельствуют, что как и в случае решения задачи в упругой постановке без учета влияния температурных напряжений [3], имеет место неравномерное распределение нагрузок по площадкам. Однако есть существенные различия. Произошло перераспределение усилий по опорным площадкам, что, вероятно, связано с различным по величине коэффициентом линейного расширения материалов грибка диска и лопаток и, как следствие, с различными деформациями элементов соединения в радиальном направлении. Так, при решении задачи с учетом влияния температурных деформаций наиболее нагруженной оказалась 3-я пара опорных площадок. Общая картина распределения усилий по опорным площадкам призамковой лопатки (с верхним штифтом) такая: 1-я пара – 23%, 2-я пара – 34%, 3-я пара – 43%, что имеет явные отличия от результатов расчета без учета влияния температурных деформаций, где наиболее нагруженной парой опорных площадок была 2-я, а усилия распределялись следующим образом: 1-я пара – 34%, 2-я пара – 34%, 3-я пара – 32%.

Как и в случае решения задачи без учета влияния температурных напряжений, имеет место отличие в величинах контактных давлений по опорным площадкам призамковых лопаток с различным расположением штифтов по радиусу.

Распределение контактных давлений по опорным площадкам

Расчетная модель		1-я пара		2-я пара		3-я пара	
		МПа	%	МПа	%	МПа	%
Призамковая лопатка (с верхним штифтом)	Без учета температуры	42,67	34	43,15	34	40,88	32
	С учетом температуры	24,34	23	34,9	34	44,92	43
Призамковая лопатка (с нижним штифтом)	Без учета температуры	41,94	34	42,78	34	40,17	32
	С учетом температуры	25,11	24	33,11	32	45,08	44
Рабочая лопатка 3D	Без учета температуры	40,5	33,5	41,31	34	39,23	32
	С учетом температуры	25,59	25	33,14	33	42,45	42
Рабочая лопатка 2D [4]		–	37	–	30	–	33

Выводы

При решении задачи об НДС замкового соединения рабочих лопаток с учетом влияния температурного поля наблюдаются результаты, отличающиеся от полученных ранее [3].

Имеет место значительное повышение напряжений, вызванное наличием температурных полей. Появлению значительных температурных напряжений главным образом способствовало, видимо, не столько наличие незначительного перепада температуры в соединении, сколько различие коэффициентов линейного температурного расширения его элементов. Зонами с наибольшими растягивающими напряжениями, как и при решении задачи без учета влияния температурных деформаций, являются участки грибка диска у отверстий под штифты, а также галтельные переходы у опорных площадок хвостов лопаток. Так, растягивающие напряжения в отверстиях по своей величине значительно превзошли предел текучести при данной температуре.

Решение задачи в термоконтактной постановке позволило оценить степень влияния температурных деформаций в замковом соединении на распределение контактных давлений по опорным площадкам элементов. Показано, что имеет место перераспределение усилий между парами опорных площадок призамковых лопаток в сравнении с результатами решения задачи без учета влияния температурных деформаций.

Результаты решения задачи об НДС в рассматриваемой постановке свидетельствуют о необходимости учета влияния температурного поля, поскольку вклад температурных деформаций в общее напряженно-деформированное состояние весьма существенен. Представляется целесообразным в дальнейшем решение задачи в упруго-пластической постановке, а также с учетом деформаций ползучести.

Литература

1. Швецов В. Л., Губский А. Н., Пальков И. А., Пальков С. А. Прочность высоконапряженных элементов паровой турбины. *Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ»*. 2012. № 7. С. 70–75.
2. Шульженко Н. Г., Гришин Н. Н., Пальков И. А. Напряженное состояние замкового соединения рабочих лопаток турбины. *Проблемы машиностроения*. 2013. Т. 16. № 3. С. 37–45.
3. Швецов В. Л., Литовка В. А., Пальков И. А., Пальков С. А. Исследование напряженно-деформированного состояния замкового соединения рабочих лопаток. *Проблемы машиностроения*. 2012. Т. 15. № 2. С. 31–36.
4. Подгорный А. Н., Марченко Г. А., Гонтаровский П. П., Киркач Б. Н. Решение прикладных контактных задач методом конечных элементов. Харьков: ИПМаш АН УССР, 1984. 64 с. (Препринт/ АН УССР. Ин-т проблем машиностроения; 198).
5. Методические указания по расследованию причин повреждений деталей роторов паровых турбин электростанций: РД 153-34.1-17.424-2001. М.: ОАО «ВТИ», 2002. 82 с.
6. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Зайцев Б. Ф. Задачи термочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований). Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 370 с.
7. Либерман Л. Я., Пейсихис М. И. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении (справочник): в 3-х т. Л.: НПО Центр. котлотурбин. ин-т, Т. 1. 1996. 244 с.; Т. 2. 1996. 212 с.; Т. 3. 1997. 180 с.

Поступила в редакцию 31.05.2019

Термонапружений стан замкового з'єднання робочих лопаток першого ступеня турбіни К-500-240

¹ І. А. Пальков, ² М. Г. Шульженко

¹ Акціонерне товариство «Турбоатом»
61037, Україна, м. Харків, пр. Московський, 199

² Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10

Досліджується вплив температурного поля на напружений стан елементів замкового з'єднання лопаток турбіни, де спостерігалися поломки. З'єднання робочих лопаток турбін при підводі тепла від парового потоку знаходиться в умовах нерівномірного нагрівання. За таких умов змінюються фізико-механічні властивості матеріалів і спостерігаються градієнти температури, що викликає неоднакове теплове розширення окремих частин конс-

трукції. Це призводить до температурних напружень, які в поєднанні з механічними напруженнями від зовнішніх навантажень можуть викликати істотну пластичну деформація конструкції, породжувати тріщини або пошкодження конструкції. Для уточнення розподілу напружень по конструкції замкового з'єднання розв'язується задача з урахуванням температурного поля. Розв'язання задачі здійснюється в термоконтактній постановці з урахуванням впливу теплообміну на передачу зусиль в замковому з'єднанні. Задача контактної взаємодії є істотно нелінійною, і зв'язок температурної задачі із задачею механіки здійснюється через заздалегідь невідомі граничні умови в контакті. Напружений стан і характер контактної взаємодії залежать від розподілу температури, що визначається умовами взаємодії. Розв'язок термоконтактної задачі в замковому з'єднанні базується на застосуванні моделі контактної взаємодії. Зони передбачуваної контактної взаємодії визначаються контактними елементами. Механічна взаємодія поверхонь контакту визначається величиною їхнього взаємного проникнення. Задача розв'язується з використанням методу скінченних елементів, загальне число елементів - 371498. У розглянутій моделі є кілька зон контактної взаємодії: а саме, область дотику штифтів з диском, а також із замковою лопаткою і призамковими лопатками; область дотику опорних площадок хвоста призамкової лопатки і хвостовика диска. У зонах контакту здійснюється згуцнення сітки. Наведені результати розрахунку у вигляді розподілу температури по замковому з'єднанню. Показано, що має місце перепад температури по радіусу і ширині диска. Температура 533 °C з боку входу пари падає до рівня 525 °C з боку виходу пари. Наводяться результати попередньої оцінки напруженого стану замкового з'єднання робочих лопаток першого ступеня циліндра середнього тиску парової турбіни, які свідчать про значні напруження, здатні викликати пластичну деформацію.

Ключові слова: турбіна, замкове з'єднання, робоча лопатка, напружений стан, контактний тиск, температурне поле, жорсткість контакту.