

## ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗЬБЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ПО ВИТКАМ И РАВНОПРОЧНАЯ РЕЗЬБА

©2011 М. И. Курушин, А. М. Курушин, А. В. Суслин

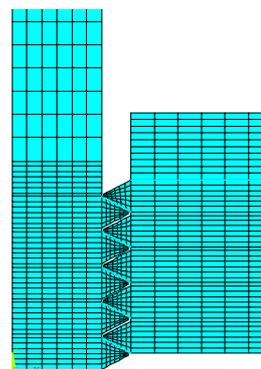
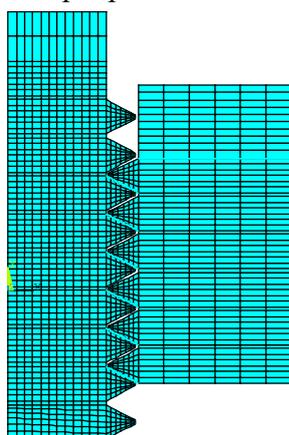
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

На распределение усилий по виткам резьбы влияет не только разница деформаций стержня (растяжение) и гайки (сжатие), но и неравномерное по высоте гайки радиальное расширение тела гайки и сжатие резьбовой части стержня, а также скручивание тела гайки в радиальной плоскости и, самое главное, разношаговость витков вследствие погрешностей изготовления. С точки зрения прочности стремиться нужно не к выравниваю усилий по виткам резьбы, а наоборот, за счет разношаговости добиться равнопрочности в витках по высоте резьбовой части соединения. В нашем исследовании показано, что в равнопрочной резьбе за счет регулируемой разношаговости можно снизить максимальные напряжения на 50% по сравнению с точно изготовленной (с одинаковыми шагами) резьбой. В такой резьбе отклонение шагов близко к линейному и в определенном диапазоне нагрузок прочность резьбы почти не зависит от величины самой внешней нагрузки.

*Резьбовые соединения, распределение усилий по виткам, погрешности изготовления, прочность элементов резьбовых соединений, равнопрочность.*

В работе приведены результаты исследования стандартного резьбового соединения М10 методом конечных элементов с использованием программного комплекса

ANSYS. Конечно - элементные модели резьбовых соединений показаны на рис. 1. Ввиду симметрии резьбового соединения в качестве расчетной принята плоская, осесиммет-



а



б

Рис.1. Распределение усилий по виткам точно изготовленной резьбы в статике в процентном отношении к нагрузке на болт:

а - при шести витках в контакте, а также двух витках свободных (не в контакте) до и одном витке свободном (не в контакте) после гайки;

в - при пяти витках в контакте без свободных (не в контактах) витков до и после гайки

ричная упругая модель. Винтовая нарезка заменена кольцевыми выступами. Материал деталей – сталь (модуль упругости материала – 200000 МПа). Сетка регулярная.

На рис.1 приведены графики распределения усилий по виткам идеально точной по изготовлению (все шаги одинаковые на стержне болта и на теле гайки) резьбы в процентном отношении к нагрузке на стержень болта в статике. На рис. 1, а при шести витках в контакте и также двух витках свободных (не в контакте) до и одним витке свободном (не в контакте) после гайки, а на рис 1, б - распределение усилий по виткам резьбы при пяти витках в контакте без свободных (не в контактах) витков до и после гайки. В этих расчетах учтены все виды деформаций элементов резьбовых соединений (неравномерность сжатия стержня и растяжения тела гайки, а также скручивание тела гайки в радиальной плоскости), а не только растяжение и сжатие соответственно элементов стержня и тела гайки. Видно, что, во-первых, первый виток воспринимает на себя не 52 % (чуть больше половины) всей

нагрузки (как принято в учебной технической литературе при учете только растяжения элементов стержня болта и сжатия элементов тела гайки в осевом направлении, и как это было впервые найдено Жуковским Н.Е.), а только приблизительно третью часть (32...33 %) от нее. Во-вторых, наличие свободных от нагрузки витков, как до, так и после контактирующих витков, несколько снижает (на 2...3 %) нагрузку на первый виток. При высоких же частотах возбуждения переменными усилиями изделия (преимущественно со стороны корпуса) и особенно в районах собственных частот элементов резьбовых соединений распределение усилий может быть совершенно не таким, как в статике.

В табл. 1 приведены расчеты максимальных эквивалентных напряжений по впадинам витков стержня болта М10 при изготовлении их с погрешностями шагов в гайке, рассчитанных методом конечных элементов по программам ANSYS. В контакте пять рабочих витков.

Таблица 1. Максимальные эквивалентные напряжения по впадинам витков стержня болта М10 при изготовлении их с погрешностями шагов в гайке

Порядковый номер витков с погрешностями в контакте	Максимальные эквивалентные напряжения по виткам в контакте, МПа					
	Погрешности шагов гайки, мкм					
	+1	-1	+5	-5	+10	-10
	При точно изготовленной резьбе по шагам, МПа					
	1266.4					
Резьба с погрешностями по шагам гайки						
1	1228.8	1306.3	1071.2	1467.7	1234.4	1661.5
2	1281.7	1250.1	1348.4	1192.6	1410.	1421.3
3	1276.3	1255.1	1323.3	1213.3	1341.0	1169.8
4	1273.2	1259.8	1302.1	1194.9	1307.9	1194.9
5	1270.5	1261.8	1286.1	1243.2	1292.0	1223.1

Нагрузка на болт 20 кН. Видно, что особенно сильно на изменение максимальных эквивалентных напряжений сказываются ошибки шагов первых витков в контакте. Увеличение первых шагов гайки ведет к уменьшению, а уменьшение к увеличению эквивалентных напряжений в первых витках. Жирным шрифтом отмечены максимальные эквивалентные напряжения, которые возникают не на первых, а на вторых и третьих витках. Так, при уменьшении шага первого витка гайки на 1 мкм эквивалентные напряжения во впадине первого витка

стержня увеличиваются по сравнению с точно нарезанной резьбой на 3 %, при 5 мкм - на 16 %, при 10 мкм - на 31 %.

В инженерной практике принято пытаться выравнять усилия по виткам с целью увеличения прочности резьбовых соединений. По нашему мнению, с точки зрения прочности следует стремиться не к выравниванию усилий по виткам резьбы, а стремиться сделать витки равнопрочными по всей контактной высоте резьбового соединения.

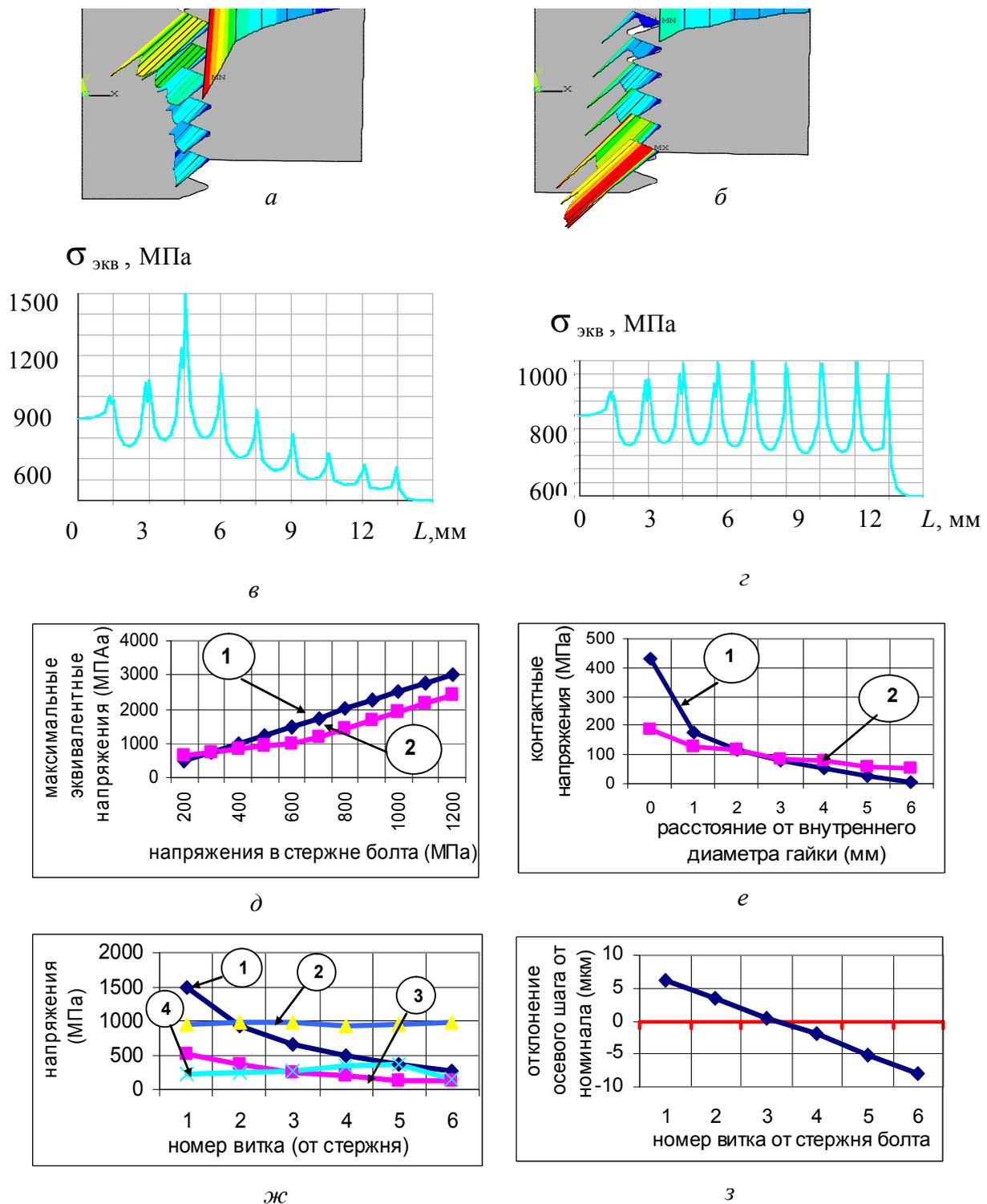


Рис. 2. Резьбовое соединение с шестью витками:

а, б – контактные напряжения по поверхностям витков точной и равнопрочной нарезки соответственно; в, г – эквивалентные напряжения по впадинам точной и равнопрочной нарезки соответственно; д – максимальные эквивалентные напряжения по впадинам точной (1) и равнопрочной (2) нарезки; е – контактные напряжения по торцу точно нарезанной (1) и равнопрочной (2) гайки; ж – максимальные эквивалентные напряжения по виткам резьбы: 1 – стержень соединения с точными (равными) шагами; 2 – стержень с шагами равнопрочной резьбы; 3 – гайка с точными (равными) шагами; 4 – гайка с шагами равнопрочной резьбы; з – отклонения осевых шагов от номинала для равнопрочной резьбы при усилии на болт 2 кН

Этого можно добиться как раз за счет неравномерного распределения усилия по виткам по высоте резьбовой части. В наиболее напряженных местах – во впадинах витков, по образующей впадин витков стержня, где суммируются напряжения растяжения в стержне с изгибными напряжениями витков, эквивалентные напряжения, например по Мизесу, максимальные. Так как напряжения растяжения в элементах стержня к концу резьбового соединения уменьшаются, то для поддержания равнопрочности витков необходимо относительно увеличивать составляющие напряжений от изгиба витков. Мы попытались подобрать такие отклонения шагов в контактах витков, чтобы максимальные эквивалентные напряжения по всем виткам были одинаковыми. Таким образом, резьба будет равнопрочной по всей контактной высоте резьбового соединения. Технологически лучше всего это можно сделать за счет изменения шагов витков в гайке. На графике рис. 2, з приведены значения отклонений от номинала осевых шагов для равнопрочной резьбы М10 при статическом усилии на болт 20 кН. Значения их, начиная от первого витка гайки, следующие: + 6,23; +3,4; +0,5; -2,0; -5,1; -7,85 мкм. Как видно по графику, значения эти близки к линейным, что технологически легко может быть реализовано на практике.

На рис.2, а, б показано распределение контактных усилий по виткам соответственно для случая точно изготовленной (с одинаковыми шагами) резьбы и для равнопрочной резьбы при принятой статической нагрузке на болт 20кН. Видно, что для случая точной нарезки максимальное усилие приходится на первый виток, а для случая равнопрочной резьбы, наоборот, максимальное усилие приходится на последний виток.

На рис. 2, в, г показано изменение эквивалентных напряжений по образующей цилиндра впадин витков соответственно для точно изготовленной нарезки и для равнопрочной резьбы. Видно, что в равнопрочной резьбе за счет регулируемой разношагово-

сти можно снизить максимальные эквивалентные напряжения на 50% по сравнению с точно изготовленной (с одинаковыми шагами) резьбой.

На рис. 2, д для принятого варианта разношаговости витков показано изменение максимальных эквивалентных напряжений при различных значениях напряжений (усилий) в болте. Видно, что в определенном диапазоне нагрузок на болт в равнопрочной резьбе напряжения почти не зависят от нагрузки. Можно полагать, что в этом случае при изменении переменных составляющих внешней нагрузки переменные напряжения в витках будут изменяться незначительно, что приведет дополнительно к еще большему увеличению усталостной прочности равнопрочного резьбового соединения. Кроме того, как это видно на графике рис.2, е, контактные напряжения по торцу гайки в равнопрочной резьбе распределяются более равномерно по радиусу, что должно увеличивать сопротивление гайки самоотвинчиванию в условиях вибраций изделий с равнопрочной резьбой. На рис. 2, ж для сравнения приведены распределения значений эквивалентных напряжений по виткам стержня и гайки для точно изготовленной резьбы и равнопрочной.

Таким образом, в нашем исследовании показано, что в равнопрочной резьбе за счет регулируемой разношаговости можно снизить максимальные напряжения на 50% по сравнению с точно изготовленной (с одинаковыми шагами) резьбой. В такой резьбе отклонение шагов близко к линейному, что облегчает ее изготовление. В диапазоне нагрузок, при которых подбиралась разношаговость, прочность резьбы почти не зависит от величины самой внешней нагрузки, что дополнительно повышает её усталостную прочность. И ещё при равнопрочной резьбе контактные напряжения по торцу гайки распределяются более равномерно по радиусу, что также должно увеличивать сопротивление гайки самоотвинчиванию в условиях вибраций изделий.

## THREAD PRODUCTION ACCURACY IMPACT ON FORCES DISTRIBUTION IN THREAD AND FULL-STRENGTH THREAD

© 2011 M. I. Kurushin, A. M. Kurushin, A. V. Suslin

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Not only difference of deformation of bolt rod (tension) and nut (compression) but non-uniform in height radial extension of nut and compression of thread part of the rod, nut body twisting in radial plane and above all irregular pitch due to production irregular has an impact on force distribution in thread. It should not strive for a precise production of thread with uniform pitch but on the contrary, due to control irregular thread pitch full-strength of thread can be reach. Our numerical investigation shows, that using of control irregular thread pitch can decrease maximal stresses by 50% in comparison with precisely produced thread.

*Thread joint, load distribution in thread, production accuracy; thread joints strength, irregular pitch, full-strength.*

### Информация об авторах

**Курушин Михаил Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел. (846) 336-98-52. Область научных интересов: динамика и механика соединений и элементов конструкции машин.

**Курушин Александр Михайлович**, инженер кафедры основ конструирования машин, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел. (846) 336-98-52. Область научных интересов: динамика и механика соединений и элементов конструкции машин.

**Суслин Алексей Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел. (846) Область научных интересов: динамика и механика соединений и элементов конструкции машин.

**Kurushin Michail Ivanovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 336-98-52. Area of research: Thread joint, load distribution in thread, production accuracy.

**Kurushin Alexander Michailovich**, ingener, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: Thread joint, load distribution in thread, production accuracy.

**Suslin Aleksey Vasiljevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 336-98-52. Area of research: Thread joint, load distribution in thread, production accuracy.