



Параметрический расчёт напряжённого состояния зубьев в передаче винт–гайка



Александр КРАВЧУК
Alexander S. KRAVCHUK

Анжелика КРАВЧУК
Anzhelika I. KRAVCHUK



Иван ТАРАСЮК
Ivan A. TARASYUK

Кравчук Александр Степанович – доктор физико-математических наук, профессор Белорусского государственного университета (БГУ), Минск, Беларусь. Кравчук Анжелика Ивановна – кандидат физико-математических наук, доцент БГУ, Минск, Беларусь. Тарасюк Иван Александрович – аспирант кафедры био- и наномеханики БГУ, Минск, Беларусь.

Parametric Calculation of the Stress State of Teeth in Screw-Nut Transmission

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 78)

Передачи винт–гайка применяются в механизмах управления для преобразования вращательного движения в поступательное или наоборот. Авторами предложена методика определения прочности и износостойкости передачи скольжения винт–гайки на основе решения контактной задачи для её радиального сечения с учётом различия материалов деталей передачи. Объектом исследования являются винт, который изготовлен из стали, и гайка из оловянной бронзы. В статье представлено решение задачи для трапециевидного профиля резьбы, разобраны основные пошаговые действия в ANSYS 10 ED, а также параметризованный код APDL, позволяющий выбирать оптимальные геометрические параметры передачи и механические параметры её деталей с точки зрения долговечности.

Ключевые слова: механика, передача винт–гайка, напряжённое состояние, метод конечных элементов, ANSYS, параметрическая модель, трансформация движения.

Такие передачи, как винт–гайка, используются в механизмах управления воздушных и водных судов, в приводах станков, манипуляторов и измерительных машин, а также в различных строительных инструментах [1].

В статье представлена методика расчёта изгибной жёсткости зубьев произвольного профиля передачи скольжения винт–гайка с помощью программы конечно-элементного анализа ANSYS 10 ED на примере решения контактной задачи для трапециевидного профиля резьбы. Технический смысл расчёта состоит в том, чтобы за счёт выбора геометрии профиля зубьев обеспечить полное прилегание в передаче скольжения их контактирующих рабочих поверхностей и исключить перераспределение контактных напряжений из-за изгибных деформаций. Кроме того, снижение изгибных деформаций зубьев в передаче винт–гайка при проектировании снизит их склонность к износу [2–5]. При этом предлагаемая методика учитывает возможность примене-

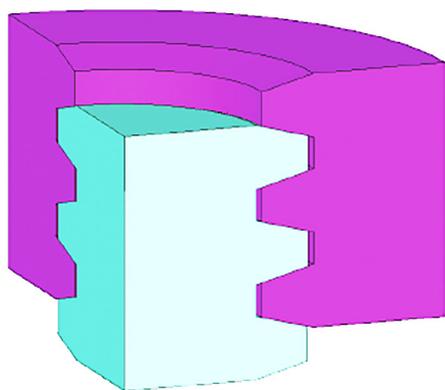


Рис. 1. Взаимодействие зубов в модели передачи винт–гайка.

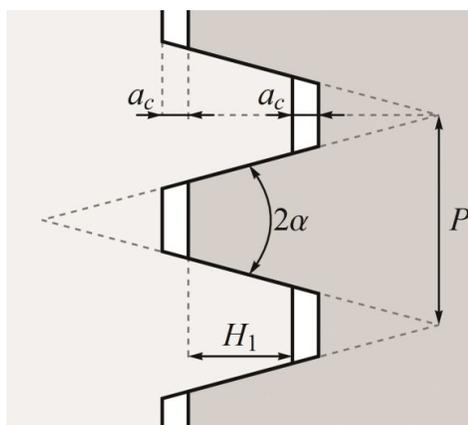


Рис. 2. Размеры трапециевидного профиля передачи винт–гайка.

ния различных материалов в звеньях передачи.

МЕТОДИКА КОНСТРУИРОВАНИЯ

Рассматривается осевое сечение передачи, винт которой выполнен из стали, а гайка – из антифрикционной оловянной бронзы. При оценочном решении с учётом ограничений, налагаемых на количество элементов в ANSYS 10 ED, игнорируется наклон резьбы по отношению к осям винта и гайки, а задача сводится к взаимодействию осесимметричных зубчатых тел, что позволяет перейти от пространственной задачи для винтовой резьбы к плоской задаче для радиального сечения винта и гайки (рис. 1).

Это несущественное с точки зрения точности вычислений упрощение приводит к большой экономии ресурсов системы и позволяет воспользоваться помощью демонстрационной версии ANSYS 10 ED [9–12]. Предполагается, что для демонстрации методики достаточно оставить по три зуба на винте и гайке.

Учитывая то, что трапециевидный профиль резьбы передачи обладает пониженным приведённым коэффициентом трения, предполагая, что на рабочие поверхности зубьев нанесена смазка, трением в области контакта при решении задачи будем пренебрегать [1].

Построение модели радиального сечения передачи винт–гайка. Создание модели

Таблица 1

Физические и геометрические параметры модели

Обозначение и величина параметра	Описание параметра
$E1 = 2.10E11$	Модуль Юнга стали, $E_{ст}$ (Па)
$\nu1 = 0.29$	Коэффициент Пуассона стали, $\nu_{ст}$
$E2 = 1.22E11$	Модуль Юнга оловянной бронзы, $E_{бр}$ (Па)
$\nu2 = 0.33$	Коэффициент Пуассона оловянной бронзы, $\nu_{бр}$
$P = 4.00E-3$	Шаг резьбы, P (м)
$H1 = 2.00E-3$	Рабочая высота профиля, H_1 (м)
$AC = 0.25E-3$	Зазор по вершине зуба резьбы, a_c (м)
$RV = 5.75E-3$	Внутренний радиус винта, $R_в$ (м)
$TG = \text{TAN}(15)$	Половина угла профиля, α (°)
$DY = 5.00E-7$	Перемещение гайки, Δy (м)
$X0 = H1 + AC$	Высота зуба резьбы, x_0 (м)
$Y0 = X0 \cdot TG$	Полуразность основания и вершины зуба, y_0 (м)
$H0 = P/2 - H1 \cdot TG$	Вершина зуба резьбы, h_0 (м)
$RG = RV + X0 + AC$	Внутренний радиус модели гайки, $R_г$ (м)



Ключевые точки радиального сечения модели зуба винта

Номер ключевой точки КР	X-Loc (м)	Y-Loc (м)
1	RV	0
2	RV+X0	Y0
3	RV+X0	Y0+H0
4	RV	2 • Y0+H0
13	0	2 • (P+Y0)+H0
14	0	0

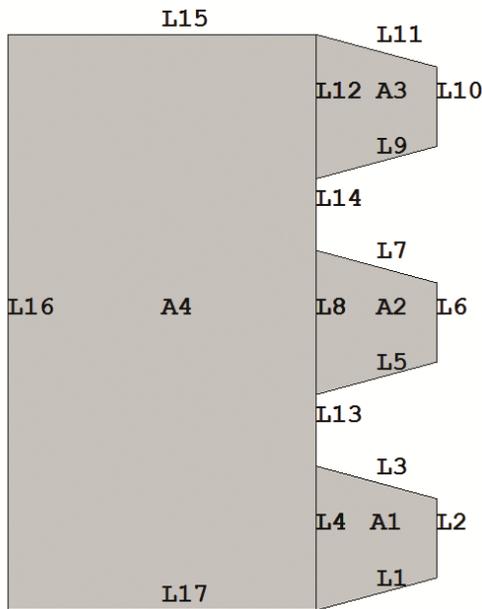


Рис. 3. Радиальное сечение модели винта.

Parameters > Scalar Parameters. В поле *Selection* появившегося окна ввести необходимые параметры (таблица 1).

На первом шаге производится построение ключевых точек модели передачи винт–гайка. В данном случае ключевыми являются угловые точки сечения модели зуба винта, а также точки, лежащие на оси симметрии сечения. Создание их осуществляется с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS.* В окне *Create Keypoints in Active Coordinate System* необходимо ввести номера и координаты точек в полях *Keypoint number* и *X, Y, Z Location in active CS* (таблица 2).

На втором шаге производится построение поверхности радиального сечения модели зуба винта. Поскольку границы сечения являются прямыми линиями, ANSYS позволяет создавать поверхность сразу по ключевым точкам, не производя ограничивающих её линий. Линии появятся автоматически при создании поверхности с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs.* Указание точек модели зуба следует производить только в одном направлении обхода области (по/против часовой стрелки, например 1, 2, 3, 4).

Третьим шагом является копирование поверхности, определяющей сечение модели зуба: два раза со сдвигом в шаг резьбы *P* вдоль оси *OY*. Для этого используется пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Areas.* В появившемся окне надо указать количество копий (включая оригинал) 3 в поле *Number of copies – including original* и шаг копирования *P* (м) в поле *Y-offset in active CS.*

Следующим шагом станет создание поверхности радиального сечения модели

будет производиться «снизу вверх», с учётом того, что осью симметрии конструкции является *OY*, а вся модель должна быть построена в первой четверти координатной плоскости *XOY* [9, 10]. Причём все геометрические размеры будут задаваться параметрическим образом. Для решения задачи используют размеры профиля *Tr16×4* (рис. 2), соответствующие ГОСТ 9484–81 [13] и ГОСТ 24737–81 [14].

Для упрощения построения модели следует произвести смену единиц измерения углов с помощью пункта *Utility Menu > Parameters > Angular Units.* В появившемся окне требуется выбрать *Degrees* в списке *Units for angular-parametric functions.* Далее задать параметры, которые будут использоваться при создании модели передачи винт–гайка, воспользовавшись пунктом меню *Utility Menu >*

тела винта. После использования пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs* следует последовательно указать точки, лежащие на внутреннем радиусе на оси симметрии сечения модели винта. Проводить выбор точек необходимо только в одном направлении обхода области (по/против часовой стрелки, например 1, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 14) (рис. 3).

На четвёртом шаге производится построение поверхности радиального сечения модели гайки, толщина тела которой предполагается равной внутреннему радиусу тела винта R_g . Для этого требуется произвести отражение поверхностей, соответствующих модели винта, относительно плоскости $Y-Z$, используя пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Areas*, а в списке с меткой *MOVE* указать, что поверхности копируются (рис. 4).

Новые поверхности нужно переместить вдоль оси OX на величину суммы внутренних радиусов винта R_g и гайки R_g , вдоль оси OY на половину шага резьбы $P/2$ с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move / Modify > Areas > Areas*. Для этого в появившемся окне назвать количество копий (включая оригинал) 1 в поле *Number of copies – including original* и шаги копирования $RV+RG$ (m) и $P/2$ (m) в полях *X-offset in active CS* и *Y-offset in active CS*. Очевидно, что вращением вокруг оси OY можно получить объёмную модель передачи в пределах принятых геометрических упрощений.

Выбор типа задачи и свойства материалов модели. В соответствии с логикой организации главного меню выбор типа решаемой задачи запрашивается на первом шаге перед подготовкой геометрической модели. Однако практика работы в ANSYS 10 ED с такими дополнительными модулями, как LS-DYNA или FLOTRAN, показывает, что выбор лучше производить после подготовки всей геометрии модели. Для этого необходимо воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preferences...* и в окне *Preferences for GUI Filtering* указать *Structural*.

При решении задачи будут использоваться линейно-упругие материалы: сталь

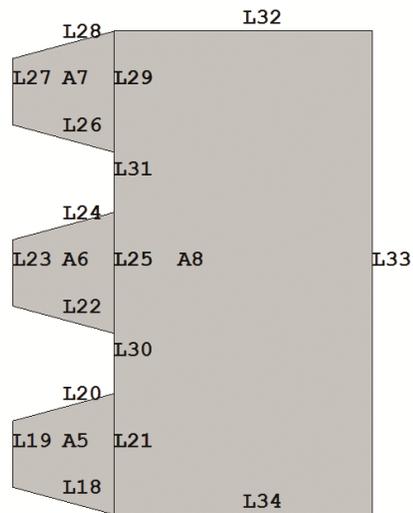


Рис. 4. Радиальное сечение модели гайки.

для модели винта и антифрикционная оловянная бронза для модели гайки (таблица 3) [1]. Для создания двух моделей материалов необходимо с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models* вызвать окно *Define Material Model Behavior*. Используя пункты верхнего раскрывающегося меню и разделы библиотеки доступных материалов *Material Models Available* (справа в общем окне *Define Material Model Behavior*), требуется указать физические характеристики двух разных материалов, перечисление и значения которых заносятся в левое окно *Material Models Defined* общего окна *Define Material Model Behavior*.

В окне *Define Material Model Behavior* «по умолчанию» доступен один материал *Material Number 1* (отображается в левом окне и подсвечивается курсором). В правом окне с помощью пункта *Define Material Model Behavior > Material Models Available > Structural > Linear > Elastic > Isotropic* отмечается, что материал является линейно-упругим, и в появившемся окне *Linear Isotropic Properties for Material Number 1* требуется ввести нужные значения упругих констант стали (таблица 1): модуль Юнга E 1 ($Па$) в поле с меткой E_X и коэффициент Пуассона ν 1 в поле с меткой ν_{XY} , а затем нажать *OK*.

Далее, вернувшись в общее окно *Define Material Model Behavior*, для добавления



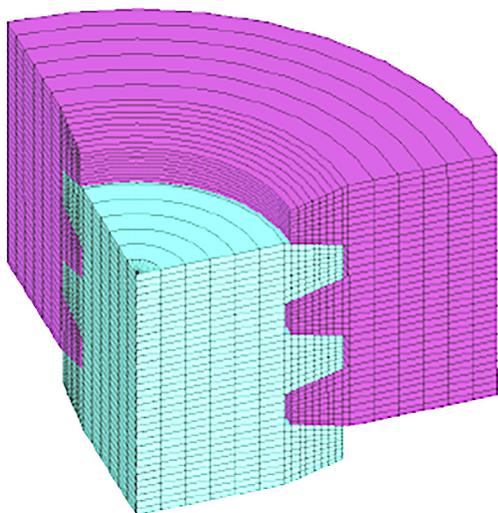


Рис. 5. Упорядоченное разбиение модели передачи винт–гайка.

второго материала необходимо использовать пункт меню *Define Material Model Behavior > Material > New Model*. После подтверждения, что номер добавляемого материала следует оставить «по умолчанию» (т.е. 2), можно выбрать ещё одну модель поведения материала с другими характеристиками. В данном случае материал также будет линейно-упругий (это указывается через пункт меню *Define Material Model Behavior > Material Models Available > Structural > Linear > Elastic > Isotropic*) с упругими константами, которые соответствуют оловянной бронзе (таблица 1): модулем Юнга $E2$ ($Па$) и коэффициентом Пуассона $\nu2$. Их следует ввести в появившемся окне *Linear Isotropic Properties for Material Number 2* в полях E_X и ν_{XY} соответственно, а затем нажать *OK*.

Выбор типа элемента для разбиения модели. Поскольку поставленная задача соответствует структурному анализу, следует выбрать тип элементов *Structural Solid* и элементы *Quad 4node 182*. Выбор производится при использовании пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete* после нажатия кнопки *Add* в окне *Element Types*. После этого в окне *Element Types* надо нажать кнопку *Options* и в списке *Element Behavior* включить опцию *Axisymmetric*, затем нажать *OK* и закрыть окно.

Назначение атрибутов поверхностям модели. В ANSYS под атрибутами геометрических компонентов модели понимаются номера материала *Material number* (различается для моделей винта и гайки), типа элементов *Element type number* (одинаков для всех компонент модели), набора *Real constant set number* и сечения *Element section* (не используются). Перечисленный набор атрибутов присваивается каждой компоненте геометрической модели отдельно с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas*. В появившемся меню необходимо выбрать поверхности, соответствующие сечению модели винта ($A1, A2, A3, A4$), а затем нажать *OK* (рис. 3). В окне *Area Attributes* все значения следует оставить «по умолчанию» и нажать *Apply*. Затем требуется выбрать поверхности, соответствующие сечению модели гайки ($A5, A6, A7, A8$), нажать *OK* и в окне *Area Attributes* в списке *Material number* сменить номер материала на 2 (рис. 4).

Построение упорядоченного разбиения модели. Для этого надо произвести конкатенацию нескольких линий (логическое объединение) с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Lines*. Используя появившееся меню, следует выбрать линии, лежащие на внутреннем радиусе сечения модели винта ($L4, L8, L12, L13, L14$), а затем нажать *Apply* (рис. 3). Далее произвести выбор линий, лежащих на внутреннем радиусе сечения модели гайки ($L21, L25, L29, L30, L31$), и нажать *OK* (рис. 4).

Для задания размера разбиения поверхностей необходимо воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Areas > All areas* и в появившемся окне указать длину стороны элемента $(P-2 \cdot Y0-H0)/4$ (m), что соответствует разбиению линий, моделирующих впадины резьбы, на четыре части. Поскольку при решении контактной задачи может использоваться более грубая сетка вдали от области контакта из-за наличия ограничения на количество элементов в ANSYS 10 ED, следует уменьшить линейный размер элемента в радиальном направлении для

поверхностей, моделирующих сечения тел винта и гайки. Для этого, используя пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Lines > Picked Lines*, требуется выбрать линии сечения моделей винта и гайки, которые лежат перпендикулярно оси симметрии модели гайки (например, *L15* и *L32*), а затем в окне *Element Size on Picked Lines* в поле *No of element divisions* указать количество делений 6 (рис. 3, 4).

После выполнения перечисленных действий сечение модели передачи готово к построению упорядоченного разбиения с помощью пункта главного меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 sided*. При его использовании появится окно *Mesh Areas*, в котором кнопкой *Pick All* надо показать, что будет производиться разбиение всей модели целиком (рис. 5).

После построения разбиения следует удалить конкатенацию линий с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Del Concats > Lines*. При появлении меню выбора нажимается *Pick All*.

Назначение граничных условий. Задание краевых условий на модель передачи винт–гайка начинают с простейших ограничений. Во-первых, необходимо закрепить сечение модели винта по оси симметрии (в данном случае запретить его перемещение вдоль оси *OY*) и, во-вторых, назначить ненулевое перемещение внешней границы модели гайки в осевом направлении (задать перемещение в отрицательном направлении оси *OY*).

Включается пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Displacement > On Lines*. Для задания первого граничного условия требуется выбрать линии сечения модели гайки, которые лежат перпендикулярно её оси симметрии (*L15* и *L17*), нажать *OK*, в появившемся окне выбрать метку *UY*, в поле *VALUE* задать величину перемещения θ (м) и нажать кнопку *Apply* (рис. 3). После этого для задания второго граничного условия следует выбрать линии сечения модели винта, лежащие перпендикулярно оси симметрии сечения модели гайки (*L32* и *L34*), нажать *OK*, в появившемся окне выбрать метку *UY* и в поле

VALUE задать величину перемещения — DY (м).

Одним из самых сложных типов краевых условий в структурной механике считается создание контактных пар между взаимодействующими поверхностями не связанных между собой твёрдых тел. При этом в двумерном случае необходимо задать линии внедрения и контактные линии. Первыми являются верхние линии сечения моделей зубьев резьбы гайки (*L3*, *L7*, *L11*), вторыми — нижние линии сечения моделей зубьев резьбы винта (*L18*, *L22*, *L26*) (рис. 3, 4).

Для получения контактной пары надо запустить *Contact Manager* с помощью пункта меню *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Contact Pair*, нажать кнопку *Contact Wizard* и с её помощью запустить мастера создания контактных пар. В первом появившемся окне следует оставить все опции «по умолчанию» (поверхность внедрения выступает податливой линией), нажать кнопку *Pick Target*, выбрать линии внедрения (*L3*, *L7*, *L11*), подтвердить выбор нажатием кнопки *OK*, а затем перейти к следующему окну мастера нажатием *Next* (рис. 3). В новом окне мастера остаются все опции «по умолчанию» (поверхность и область контакта являются линиями), нажать кнопку *Pick Contact*, выбрать контактные линии (*L18*, *L22*, *L26*), подтвердить выбор нажатием *OK* и перейти к следующему окну нажатием кнопки *Next* (рис. 4). В последнем окне опять оставить все настройки «по умолчанию» (не создавать симметричный контакт ввиду ограничения на количество элементов в ANSYS 10 ED, учитывать начальное внедрение, пренебрегать трением, а также другие опции в разделе *Optional settings*) и создать контактную пару нажатием кнопки *Create*. После этого в окне ANSYS Graphics будут отображены созданные контактные элементы.

Вообще говоря, в качестве контактирующих поверхностей следует указывать обе боковые поверхности сечения моделей зубьев резьбы, однако это приводит к превышению ограничения на количество элементов в учебной версии ANSYS 10 ED.



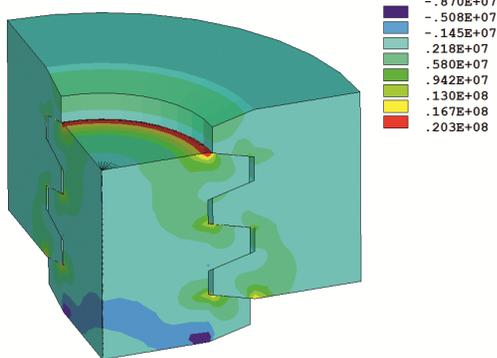


Рис. 6. Распределение первых главных напряжений в модели передачи винт-гайка.

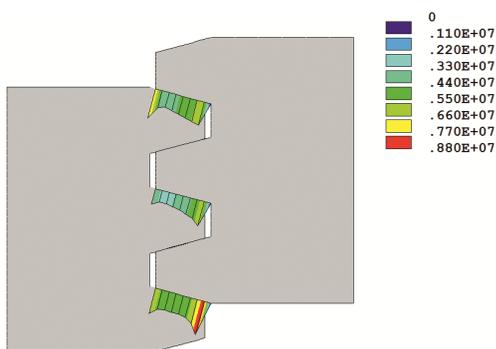


Рис. 7. Распределение контактных давлений в сечении модели передачи винт-гайка.

ОСОБЕННОСТИ ОТОБРАЖЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перед запуском решения, ввиду нелинейности задачи, предстоит воспользоваться пунктом меню *Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls* и включить опцию *Large Displacement Static* в раскрываемом списке *Analysis Options*. Кроме того, необходимо задать количество итераций решения 100 в пункте *Number of substeps* (количество итераций задаётся для нелинейного или нестационарного анализа), а также включить опцию автоматического подбора временного шага решения, выбрав *On* в раскрываемом списке *Automatic time stepping*.

Если не произвести установку шагов интегрирования задачи, после запуска решения появится информационное сообщение (предупреждение) об обязательности задания размера итерации или их количества. Для решения поставленной задачи необходимо воспользоваться пунктом главного меню *Main Menu > Solution > Solve > Current LS*.

Таблица 3

Программный код ANSYS APDL для решения поставленной задачи

№	Команда	№	Команда
1	*AFUN, DEG	46	LSEL, A, LOC, X, RG+RV/2
2	E1 = 2.10E11	47	LESIZE, ALL,,,6
3	NU 1 = 0.29	48	MSHKEY,1
4	E2 = 1.22E11	49	AMESH, ALL
5	NU 2 = 0.33	50	LSEL, S, LCCA
6	P = 4.00E-3	51	LDELE, ALL
7	H1 = 2.00E-3	52	LSEL, S, LOC, X, RV/2
8	AC = 0.25E-3	53	DL, ALL,, UY,0
9	RV = 5.75E-3	54	LSEL, S, LOC, X, RG+RV/2
10	TG = TAN(15)	55	DL, ALL,, UY,-DY
11	DY = 5.00E-7	56	ALLSEL, ALL
12	X0 = H1+AC	57	MP, MU,1,0
13	Y0 = X0 * TG	58	MAT,1
14	H0 = P/2-H1 * TG	59	ET,2, TARGE169
15	L0 = 2 * (P+Y0)+H0	60	ET,3, CONTA172
16	RG = RV+X0+AC	61	KEYOPT,3,5,1
17	/PREP7	62	KEYOPT,3,9,0
18	K,1, RV,0	63	KEYOPT,3,10,2
19	K,2, RV+X0, Y0	64	LSEL, S, LOC, Y,3 * Y0/2+H0
20	K,3, RV+X0, Y0+H0	65	LSEL, A, LOC, Y,3 * Y0/2+H0+P
21	K,4, RV,2 * Y0+H0	66	LSEL, A, LOC, Y,3 * Y0/2+H0+2 * P
22	K,13,0,2 * (P+Y0)+H0	67	CM,_TARGET, LINE
23	K,14,0,0	68	TYPE,2
24	A,1,2,3,4	69	NSLL, S,1
25	AGEN,3, ALL,,,0, P,0,,1,0	70	ESLN, S,0
26	A,1,4,5,8,9,12,13,14	71	ESURF
27	ARSYM, X, ALL,,,1,0	72	LSEL, S, LOC, Y, Y0/2+P/2
28	AGEN,1,5,8,, RV+RG, P/2,0,,1,1	73	LSEL, A, LOC, Y, Y0/2+3 * P/2
29	MP, EX,1, E1	74	LSEL, A, LOC, Y, Y0/2+5 * P/2
30	MP, NUXY,1, NU 1	75	CM,_CONTACT, LINE
31	MP, EX,2, E2	76	TYPE,3
32	MP, NUXY,2, NU 2	77	NSLL, S,1
33	ET,1, PLANE182	78	ESLN, S,0
34	KEYOPT,1,3,1	79	ESURF
35	ASEL, S, AREA,,1,4	80	CMDEL,_TARGET
36	AATT,1,,1	81	CMDEL,_CONTACT
37	ASEL, S, AREA,,5,8	82	ALLSEL, ALL
38	AATT,2,,1	83	FINISH
39	LSEL, S, LOC, X, RV	84	/SOL
40	LCCAT, ALL	85	TIME,1
41	LSEL, S, LOC, X, RG	86	NSUBST,100
42	LCCAT, ALL	87	AUTOTS, ON
43	ALLSEL, ALL	88	NLGEOM, ON
44	AESIZE, ALL,(P-2 * Y0-H0)/4	89	SOLVE
45	LSEL, S, LOC, X, RV/2	90	-

Для отображения результатов решения в осесимметрично расширенной модели передачи винт-гайка нужно воспользоваться пунктом меню *Utility Menu > PlotCtrls > Style > Symmetry Expansion > 2D Axi-Symmetric...* и выбрать в появив-

шемся окне размер расширения. Возвращение к исходному виду обеспечивается нажатием *No Expansion*. Вызов окна выбора отображаемого физического параметра, вычисляемого в узлах конечно-элементной модели, осуществляется с помощью пункта главного меню *Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu*. Далее в появившемся окне *Contour Nodal Solution Data*, в списке *Item to be contoured* необходимо выбрать требуемый для отображения результат.

Отображение первых главных напряжений — одного из основных параметров для расчёта прочности деталей — функция *Nodal Solution > Stress > 1st Principal Stress* (рис. 6). Для отображения контактных давлений включается пункт *Nodal Solution > Contact > Contact Pressure* (рис. 7).

Код APDL (таблица 3) помогает получить решение задачи при различных значениях физических и геометрических параметров модели (таблица 1).

ВЫВОДЫ

Предложена методика определения прочности и износостойкости передачи скольжения винт—гайка на основе решения контактной задачи для её радиального сечения с учётом различия материалов деталей передачи. В качестве примера взят вариант для трапециевидного профиля резьбы, разобраны все основные особенности решения задачи в ANSYS 10 ED, а также представлен параметризованный код APDL, позволяющий выбирать оптимальные геометрические параметры передачи и механические параметры её деталей с точки зрения долговечности. Методика может найти широкое применение в проектных организациях, занимающихся разработкой данного типа механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рошин Г. И., Самойлов Е. А., Алексеева Н. А. и др. Детали машин и основы конструирования: Учебник. — М.: Дрофа, 2006. — 415 с.
2. Лодыгина Н. Д. Зависимость напряжений от геометрических параметров витка винтового меха-

низма // Современные наукоёмкие технологии. — 2013. — № 2. — С. 26—28.

3. Kiri B., Lacetera N., Zirulia L. Above a swamp: A theory of high-quality scientific production. *Research Policy*. — 2018. — Vol. 47(5). — pp. 827—839.

4. Тимофеев Г. А. Теория механизмов и машин. — М.: Юрайт, 2016. — 429 с.

5. Dilnot C. Thinking design: A personal perspective on the development of the Design Research Society. *Design Studies*. — 2018. — Vol. 54. — pp. 142—145.

6. Nestler M., Nitschke I., Praetorius S., Voigt A. Orientational Order on Surfaces: The Coupling of Topology, Geometry, and Dynamics. *Journal of Nonlinear Science*. — 2018. — Vol. 28(1). — pp. 147—191.

7. Li Z., Pehlken A., Qian H. & Hong Z. An automated functional decomposition method based on morphological changes of material flows. *Journal of Engineering Design*. — 2016. — Vol. 28(1). — pp. 47—75.

8. Lucero B., Linsey J. & Turner C. J. Frameworks for organising design performance metrics. *Journal of Engineering Design*. — 2016. — Vol. 27. — Iss. 4—6 [Электронный режим]: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09544828.2015.1135235>. Доступ 23.07.2018.

9. Кравчук А. С., Смалюк А. Ф., Кравчук А. И. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач: в 5 ч. — Ч. 1. Графический интерфейс и командная строка. Средства создания геометрической модели. — Минск: БГУ, 2013. — 130 с. [Электронный режим]: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43440>. Доступ 23.07.2018.

10. Кравчук А. С., Смалюк А. Ф., Кравчук А. И. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач: в 5 ч. — Ч. 2. Средства отображения и редактирования геометрических компонентов твёрдотельной модели. Примеры создания твёрдотельных моделей средствами ANSYS для решения физических задач. — Минск: БГУ, 2013. — 145 с. [Электронный режим]: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43443>. Доступ 23.07.2018.

11. Кравчук А. С., Смалюк А. Ф., Кравчук А. И. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач: в 5 ч. — Ч. 3. Определение физических констант материалов и конечно-элементное разбиение твёрдотельной модели. Примеры выполнения этих действий с построенными ранее моделями. — Минск: БГУ, 2013. — 193 с. [Электронный режим]: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43444>. Доступ 23.07.2018.

12. Кравчук А. С., Смалюк А. Ф., Кравчук А. И. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач: в 5 ч. — Ч. 4. Ограничения и нагрузки. Разделы Solution и General Postproc главного меню. Примеры постановки краевых задач, их решения и просмотра результатов. — Минск: БГУ, 2013. — 118 с. [Электронный режим]: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43445>. Доступ 23.07.2018.

13. ГОСТ 9484-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба трапециевидная. Профили. Взамен ГОСТ 9484-73; введён с 01.01.82. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 4 с.

14. ГОСТ 24737-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба трапециевидная однозаходная. Основные размеры. Взамен ГОСТ 24737-73; Введён с 01.01.82. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 6 с.

15. Кравчук А. С., Чигарев А. В. Механика контактного взаимодействия тел с круговыми границами. — Минск: Технопринт, 2000. — 196 с. ●

Координаты авторов: **Кравчук А. С.** — ask_Belarus@inbox.ru, **Кравчук А. И.** — anzhelika.kravchuk@gmail.com, **Тарасюк И. А.** — ivan.a.tarasyuk@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 23.07.2018, принята к публикации 14.09.2018.

