

УДК 621.822.082

Ю.Л. Рапацкий, доцент, канд. техн. наук,

В.М. Липка

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

u.l.rapatskiy@sevntu.com.ua

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАКАТЫВАНИЯ НАРУЖНЫХ РЕЗЬБ РОЛИКАМИ

Анализируется процесс накатывания роликами наружных резьб и рассматривается его математическая модель, позволяющая с более высокой точностью рассчитывать параметры, необходимые для проектирования технологических процессов изготовления метизов.

Ключевые слова: накатывание резьбы, радиальная сила, математическая модель.

Накатывание роликами (синонимы: накатка, поперечная накатка) винтовых поверхностей, в том числе наружных резьб, является в настоящее время наиболее прогрессивным способом получения резьбовых деталей, таких, как болты и шпильки, в массовом производстве. Преимущество получения резьб накаткой по сравнению с нарезанием резцами и плашками состоит не только в существенно большей производительности, но и в поверхностном упрочнении заготовки в зоне контакта с роликами, а также в снижении шероховатости резьбовых поверхностей.

Силы, действующие при накатывании резьб и их распределение по отдельным виткам роликов и роликам — основные факторы, существенно влияющие на конструктивные особенности и долговечность роликов, а также на качество получаемых деталей. Многочисленные эксперименты, анализ которых приведен в [1–4] и других источниках, позволили установить взаимосвязь важнейших параметров процесса накатывания и их влияние на возникающие силы и на характер нагружения роликов при различных условиях эксплуатации. Экспериментально установлено, что процесс накатывания является весьма сложным, многофакторным, поэтому все известные математические модели описывают его приближенно, с многочисленными допущениями и ограничениями. В частности, в существующих математических моделях, описывающих процессы резьбонакатывания, рассмотренных в [1, 4], недостаточно подробно учитываются свойства заготовок, существенно влияющие на величины сил, возникающих при накатывании.

Целью работы является повышение точности математической модели процесса накатывания наружной резьбы роликами на основе анализа ряда факторов, которые ранее не учитывались, что позволит улучшить качество изготавливаемых резьбовых деталей.

Рассмотрим подробнее наиболее распространенный процесс накатывания резьбы роликами, при котором из гладких цилиндрических заготовок образуются детали с винтовым профилем. Заготовку, обработанную под накатывание, устанавливают между двумя или тремя вращающимися в одном направлении инструментами, имеющими негативный профиль по отношению к профилю готовой детали (рисунок 1). Один из инструментов (роликов) подается в радиальном направлении. На рисунке 1 частота вращения роликов обозначена n , радиальная подача ролика — S . Таким образом, процесс накатывания поверхностей можно рассматривать как сочетание вдавливания в заготовку профиленкатных инструментов и прокатки, возникающей при вращении заготовки. Схема накатывания двумя роликами применяется на специализированных высокопроизводительных станках-автоматах и полуавтоматах, например, моделей А9518, А9524, А9527 (Россия) и близких к ним по конструкции UPWS 6,3x40, UPW 25x100, UPW 63, GWR-80 производства Германии. На Мелитопольском моторном заводе (МемЗ) на таких станках осуществляется массовое производство болтов, шпилек, резьбовых пробок и других резьбовых деталей, программа выпуска которых составляет до 750 тыс. шт. в год по каждому наименованию. Трехроликовыми резьбонакатными головками могут оснащаться как универсальные токарные станки, так и обрабатывающие центры, что позволяет применять накатку резьб в мелкосерийном и единичном производстве при отсутствии специализированного резьбонакатного технологического оборудования. Например, на заводе «ДП Фесто-Производство» (г. Симферополь) с помощью трехроликовых резьбонакатных головок получают резьбы от М10 до М20 на штоках и от М5 до М12 на стяжных шпильках для пневмоцилиндров различных модификаций, выпускаемых мелкими сериями и единичными изделиями.

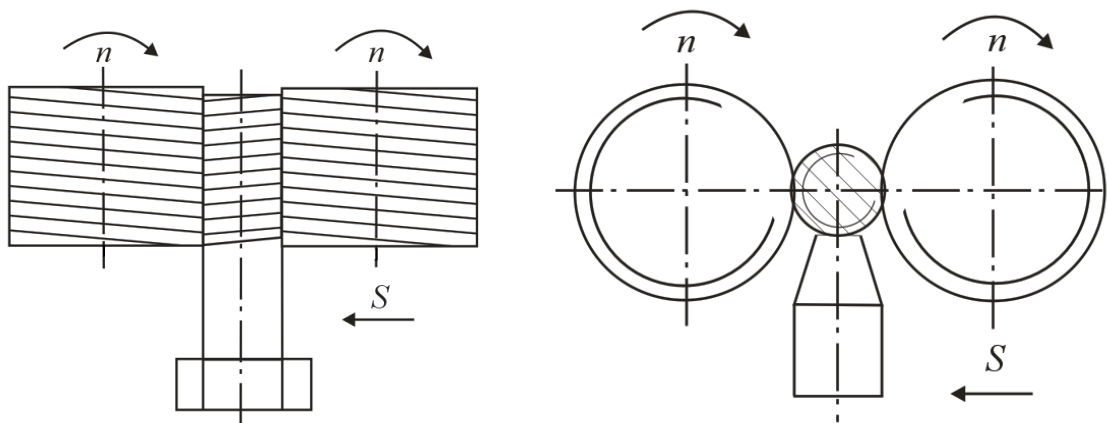


Рисунок 1 – Схема накатывания резьбы двумя роликами

На величину радиальной силы при накатывании оказывает влияние ряд параметров, среди которых наиболее существенными являются средняя толщина выдавливаемого слоя a_{cp} , приходящаяся на периметр контакта l_{II} витков заборной части ролика с заготовкой в плоскости, проходящей через ось заготовки, площадь контакта S_K витков ролика и периметр контакта $l_{II.K.}$ витков калибрующей части ролика. Таким образом, радиальная сила P_r , возникающая при накатывании, может быть выражена зависимостью [1]:

$$P_r = C a_{cp}^x S_K^y l_{II.K.}^z, \quad (1)$$

где x , y и z — степени влияния соответствующих параметров; C — коэффициент, зависящий от совокупности условий, в которых осуществляется накатывание.

Аналогично может быть выражена тангенциальная сила P_t , значение которой, согласно экспериментальным данным [1], составляет $(0,12-0,15) P_r$. Таким образом, радиальная сила P_r является доминирующей и повышение точности её расчета является важной теоретической задачей и имеет большое практическое значение при проектировании технологического процесса и инструментов для накатывания резьбы.

Рассмотрим подробнее, как определяются параметры, входящие в уравнение (1). Среднюю толщину слоя металла, выдавливаемого роликом из заготовки при их взаимодействии определим следующим образом:

$$a_{cp} = \frac{F}{l_{II}},$$

где F — площадь выдавливаемого слоя в плоскости контакта.

Площадь контакта второго и всех последующих витков ролика

$$S_K = l_{II} l_K,$$

где l_K — длина дуги контакта между точками A и B (рисунок 2, a)

Для первого витка

$$S_K = \frac{l_{II}}{2} l_K.$$

Значения площадей контакта, рассчитанные по этим формулам, превышают фактические площади на 3–7% в зависимости от диаметров ролика D_p и заготовки D_z и величины внедрения витков $H_{B.H.}$ (рисунок 3), что несколько снижает точность рассматриваемой математической модели. Компенсация возникающей погрешности возможна на основе применения компьютерной системы 3D-моделирования T-Flex CAD, например, по методике, изложенной в [4].

Подставив значения a_{cp} и S_K в уравнение (1), получим в общем виде следующую зависимость:

$$P_p = C \left(\frac{F}{l_p} \right)^x \bullet l_K \succ l_{п.к.}^z. \quad (2)$$

Среднее значение силы, действующей на ролик

$$P_p = C \left(\frac{f}{l_{п.з.}} \right)^x \bullet l_{п.з.} l_{к.з.} \succ l_{п.к.}^z, \quad (3)$$

где f , $l_{п.з.}$, $l_{п.к.}$ — средние значения параметров процесса накатывания, относящиеся к одному ролику; f — выдавливаемая площадь, мм²; $l_{п.з.}$, $l_{к.з.}$ — периметр и длина дуги контакта витков заборной части, мм; $l_{п.к.}$ — периметр контакта витков калибрующей части, мм.

Произведение $l_{п.з.} l_{к.з.}$ не является средней контактной площадью, а лишь косвенно ее характеризует. Результаты экспериментов и математический вывод зависимостей показали целесообразность использования в качестве одного из основных параметров процесса накатывания такого произведения, что не исключает возможность замены его на площадь контакта.

В схемах для расчета параметров F , l_p , l_K , представленных на рисунке 2, выдавливаемая площадь и периметр контакта зависят от величины внедрения витков ролика и их формы, а длина дуги контакта — от величины внедрения, диаметров ролика и заготовки.

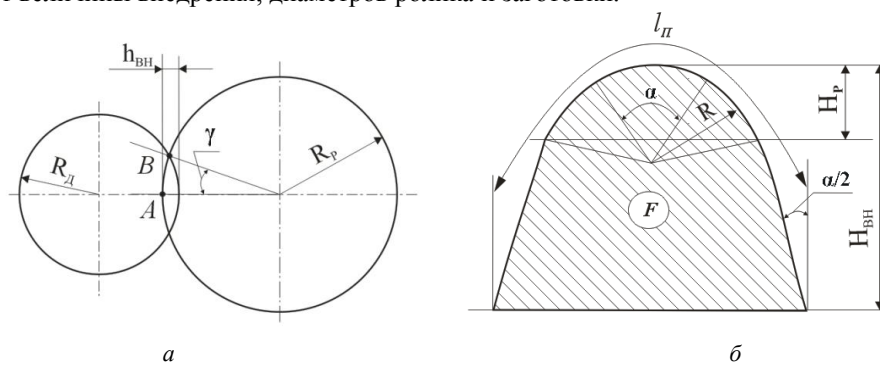


Рисунок 2 – Схема для расчета: a – длины дуги контакта; b – выдавливаемой площади и периметра контакта

В зависимостях (2), (3) степени влияния x , y , z и коэффициент C определяются экспериментальным путем. Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных на МеМЗе, показал, что для повышения точности расчетов по формулам (2), (3) величину C следует определять следующим образом:

$$C = K_1 K_2 K_3 K_4, \quad (4)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий отклонения формы заготовки; K_2 — коэффициент, учитывающий нестабильность твердости материала заготовок; K_3 — коэффициент, учитывающий отклонение диаметра заготовки от расчетного, определяемого по методике [4]; K_4 — коэффициент, учитывающий погрешность базирования заготовки в процессе калибрования и накатывания резьбы.

Значения коэффициентов в выражении (4) могут существенно отличаться как для заготовок из разных партий, так и в пределах одной партии. В экспериментах, проведенных на МеМЗе, для партии заготовок болтов М12 из стали 40Х были получены значения $K_1=1,15$; $K_2=1,25$; $K_3=1,2$; $K_4=3,05$. Определение значений коэффициентов $K_1 \dots K_4$ для заготовок из различных материалов требует дополнительных исследований.

Для расчета средних значений параметров f , $l_{п.з.}$, $l_{п.к.}$, $l_{к.з.}$ предварительно определяются параметры F , l_p , l_K для каждого витка роликов и находится их сумма. При этом учитывается, что каждый виток роликов, за исключением первого вступающего в работу витка, воздействует и на металл, выдавленный предыдущими витками.

Длина дуги контакта, представленного на рисунке 2, определяется по формуле:

$$l_K = R_p \gamma. \quad (5)$$

Угол γ определяется из зависимости

$$\sin \gamma = \frac{\sqrt{R_D^2 - X^2}}{R_p},$$

где

$$X = R_D - \frac{2H_{BH}R_p - H_{BH}^2}{2(R_D - H_{BH} + R_p)},$$

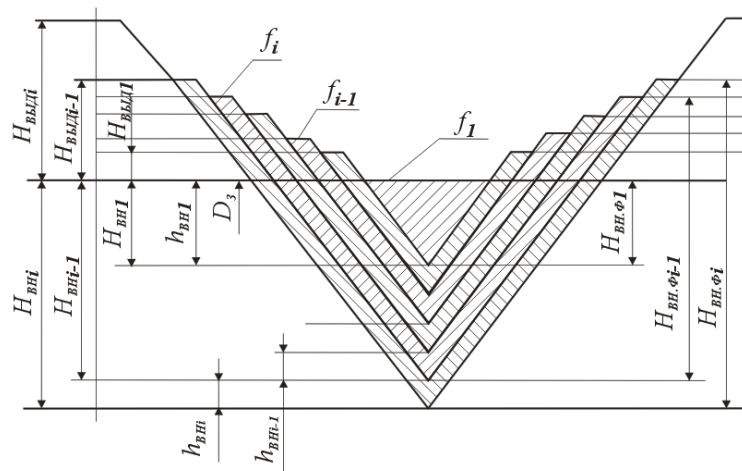


Рисунок 3 – Совмещенное расположение витков и выдавливаемая ими площадь.
Индексами 1, $i-1$, i обозначены порядковые номера витков

Рассмотренная математическая модель позволяет достаточно просто производить расчет значений основных параметров процесса накатывания по следующей методике:

1. Определение полной (накопленной) величины внедрения H_{BH} для каждого витка по фактическим перепадам высот витков роликов и величины внедрения калибрующих витков H_{BHK} в заготовку в зависимости от ее диаметра

$$H_{BH} = H_{BHK} - h_i,$$

где h_i — перепад между вершинами калибрующего и рассматриваемого витка.

2. Определение фактической величины внедрения h_{BH}

$$h_{BHi} = H_{BHi} - H_{BHi-1}.$$

3. Определение величины выдавливания $H_{ВЫД}$, которая устанавливается из условий постоянства объема до и после деформации.

Для удобства расчетов произведена замена объема на площадь, что для практических случаев накатывания головками обуславливает погрешность в величине $H_{ВЫД}$ не более 3%:

$$H_{ВЫД} = \frac{A - BH_{BHi}}{B} \sqrt{A - BH_{BKi}} - 2BF_i. \quad (6)$$

Формулы для определения значений площади выдавливаемого слоя F_i и справочные значения коэффициентов A и B для различных типов резьб приведены в [1]. Расчетные и экспериментальные величины $H_{ВЫД}$ хорошо согласуются между собой. При определении величины выдавливания $H_{ВЫДК}$ калибрующего витка в формулу (6) подставляются значения H_{BHK} и F_K .

При определении F_K в формулы $F = f(A_{BH})$ для витка с радиусной вершиной и $F_K = \phi(A_{BH})$ для витка с плоско срезанной вершиной подставляются значения $H_{BH} = H_{BHK}$.

Значение H_{BHK} рассчитывается из условия равенства площадей F_K и $H_{ВЫД}$ до и после деформации, что обеспечивается при $H'_{BHK} = t' - H_{ВЫДК}$, где $t' = t + \Delta t$ — наибольшая высота профиля накатываемой резьбы, мм; t — номинальная высота профиля резьбы, мм; Δt — половина нижнего отклонения на внутренний диаметр резьбы, мм.

4. Определение полной (накопленной) величины внедрения $H_{BH,\Phi}$ с учетом металла, выдавленного предыдущими витками:

$$H_{BH,\Phi i} = H_{B\Phi i} + H_{B\Phi i-1}.$$

5. Определение общей (накопленной) площади деформации F , нарастающей от витка к витку путем подстановки значений $H_{BH,\Phi}$.

6. Определение условной величины $H'_{BH,\Phi}$ от внедрения данного витка:

$$H'_{BH,\Phi i} = H_{B\Phi i} + h_{H\Phi i}.$$

7. Определение условной величины F' путем подстановки значений $H'_{BH,\Phi}$.

8. Расчет фактической площади, деформируемой одним витком:

$$f = F - F'.$$

9. Расчет периметра контакта l_{Π} путем подстановки значений $H_{BH,\Phi}$.

10. Расчет длины дуги контакта l_K (см. формулу (5)), причем значение x определяется по фактической величине внедрения h_{BH} .

В результате экспериментов при накатывании резьбы на стали 45 твердостью HB 190–212 получена следующая зависимость:

$$P_P = 9,4 \left(\frac{f}{l_{\Pi,3}} \right)^{0,34} \cdot l_{\Pi,3}^{0,58} \cdot l_{K,3}^{0,13}, \quad (7)$$

где $f/l_{\Pi,3}$ — средняя толщина деформируемого слоя.

Зависимость (7) получена при накатывании наружной трапецеидальной резьбы с шагом 5, 6, 8 и 10 мм с использованием заготовок $D_3 = 140–112$ мм и роликов $D_P = 80–130$ мм, что обусловило следующие параметры процесса накатывания: $f/l_{\Pi,3} = 0,05–0,25$ мм, $l_{\Pi,3} = 6–20$ мм, $l_{K,3} = 5–10$ мм, $l_{\Pi,K} = 10–56$ мм.

Расчетное значение сил с достаточной для практики точностью согласуется с экспериментальными данными.

Следует отметить ограничения и допущения, которые необходимо учитывать при практическом применении рассматриваемой математической модели. Экспериментально подтверждено, что модель наиболее точно описывает процесс накатывания резьб с треугольным профилем, в том числе метрической. Для других профилей точность незначительно снижается из-за приближенного расчета контактной площади и позволяет определять значения сил независимо от типа и шага накатываемой резьбы, диаметров роликов и заготовки, различий в конструктивных параметрах резьбовых витков роликов.

Установленная зависимость (3) применима при накатывании резьб на заготовках из конструкционной углеродистой стали твердостью HB 183–201. При изменении твердости необходимо пользоваться поправочными коэффициентами (таблица 1), установленными из условий пропорциональной зависимости величин сил от твердости [1, 3].

Таблица 1 — Поправочные коэффициенты для расчета радиальной силы

Твердость HB	159—179	183—201	207—223	229—241	248—262
Коэффициент относительной силы	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3

Основными особенностями происходящей при накатке пластической деформации являются: 1) возможность значительных деформаций без разрушений деформируемого металла (в том числе коррозионностойких, жаропрочных и других специальных сталей и сплавов); 2) существенное упрочнение поверхностных слоев в процессе деформации и связанное с этим повышение нагрузочной способности накатанных деталей. Многие эксплуатационные свойства деталей машин в значительной степени обуславливаются геометрическими характеристиками микрорельефа и физико-механическим состоянием поверхностного слоя рабочих поверхностей. При накатывании вследствие скольжения на контакте образуется поверхность, обладающая оптимальной шероховатостью, повышенной твердостью (наклепом), однородной микроструктурой и оптимальной текстурой прилегающих к поверхности слоев материала. Прочность накатанного винтового профиля при статических нагрузках выше прочности

профиля, обработанного резанием, примерно, на 10% при испытании на растяжении и на 20–35% при испытании витков на срез. Для высоконагруженных резьбовых деталей местом наибольшей концентрации напряжений являются впадины профиля. Поэтому для повышения усталостной прочности необходимо стремиться к минимальному параметру шероховатости поверхности таких участков; в этом отношении накатанный профиль обладает преимуществами перед нарезанным профилем. Изменение физико-механических свойств поверхностного слоя металла в процессе накатывания профиля оказывает еще большее влияние на усталостную прочность деталей. Образующийся наклеп поверхностного слоя и текстура металла в значительной степени повышают циклическую прочность деталей. Этому способствуют также остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое металла. Для сравнения прочности нарезанных и накатанных витков при симметричном усталостном изгибе были испытаны образцы из стали 40Х одинаковых размеров, с резьбой М12×1,25. В результате испытаний экспериментально определены пределы выносливости, которые у нарезанного профиля составляют 45 МПа, а у накатанного – 127 МПа.

Из приведенных данных следует, что накатывание винтовых поверхностей улучшает физико-механические свойства металла заготовки и в большинстве случаев устраняет необходимость последующей термообработки;

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотренная математическая модель и полученная на её основе методика расчета значений основных параметров процесса накатывания позволяют с более высокой точностью проектировать технологические процессы резьбонакатывания и инструменты для их выполнения.

2. Экспериментально подтверждено, что предел выносливости накатанного профиля в среднем в два-три раза выше, чем у нарезанного при одинаковых условиях нагружения.

3. Экспериментально установлено, что прочность накатанного винтового профиля при усталостном знакопеременном растяжении в среднем в 3,5 раза выше, чем у профиля, полученного резанием. Еще большее повышение усталостной прочности наблюдается у деталей, изготовленных из легированных сталей с высоким пределом прочности при растяжении, профиль на которых накатан после термической обработки свыше 39 HRC. Особое значение это приобретает, например, при изготовлении крепежа для ответственных резьбовых соединений в автомобильной промышленности. Кроме того, для накатанных резьбовых деталей вместо высоколегированных сталей в ряде случаев можно применять более дешевые углеродистые и малоуглеродистые стали. Это тоже подтверждает целесообразность широкого применения способа накатывания вместо обработки резанием.

Направление дальнейших исследований связано с разработкой средств и методов повышения качества резьбовых деталей, получаемых накаткой.

Библиографический список использованной литературы

1. Грудов А.А. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент. Обзор / А.А. Грудов, П.Н. Комаров; под ред. Грудова А.А. — М.: НИИмаш, 1980. — 64 с.
2. Якухин В.Г. Изготовление резьбы: справочник / В.Г. Якухин, В.А. Ставров; под ред. Якухина В.Г. — М.: Машиностроение, 1989. — 192 с.
3. Грудов А.А. Резьбонакатные ролики повышенной производительности / А.А. Грудов, П.Н. Комаров, В.Ф. Ржевский // Станки и инструмент. — 1974. — № 4. — С. 17–19.
4. Киричек А.В. Резьбонакатывание: Библиотека технолога / А.В. Киричек, А.Н. Афонин — М.: Машиностроение, 2009. — 312 с.

Поступила в редакцию 20.11.2010 г.

Рапацький Ю.Л., Липка В.М. Математична модель процесу накатування зовнішніх різей роликами

Аналізується процес накатування роликами зовнішніх різей і розглядається його математична модель, яка дозволяє з більш високої точністю розраховувати параметри, необхідні для проектування технологічних процесів виготовлення металевих різьбових виробів.

Ключові слова: накатування різі, радіальна сила, математична модель

Rapatskiy Yu.L., Lipka V.M. A mathematical model of the process of external threads rolling by rollers

The article analyzes the process of rolling outer thread by rollers and considers its mathematical model that allows to calculate the parameters required for design of technological processes of metal products manufacturing with higher accuracy

Keywords: thread rolling, radial force, mathematical model.