

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЗОТИРОВАНИЯ РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА

А. О. ИВАНЕНКО¹, И. А. ТУЛЬКОВА², М. М. УВАРОВ¹

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ivanenko@diakont.com

²АО „Диаконт“, 198517, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрен процесс освоения технологии ионно-плазменного азотирования внутренней резьбовой поверхности гайки роликвинтовой передачи. Ионно-плазменное азотирование применяется для упрочнения поверхностного слоя детали после обработки, это позволяет получить поверхность требуемого качества без дополнительного шлифования, требуемого при использовании традиционных методов объемного упрочнения. Выбраны технологические режимы и предъявлены дополнительные требования к материалу заготовки в процессе азотирования резьбовых поверхностей, которые, как правило, не подвергаются поверхностной упрочняющей обработке. В результате проведения комплекса конструктивных и технологических мероприятий обеспечен ресурс роликвинтовой передачи, более чем в пять раз превышающий показатели представленных на мировом рынке моделей, при существенном снижении стоимости изготовления вследствие исключения из технологии длительной и дорогостоящей шлифовальной обработки.

Ключевые слова: роликвинтовая передача, электромеханический привод, ионно-плазменное азотирование, резьбовая поверхность

Введение. Роликвинтовая передача (РВП) является исполнительным механизмом электромеханического привода (ЭМП) линейного типа и служит для преобразования вращательного движения электродвигателя в поступательное движение выходного штока [1]. В ЭМП производства АО „Диаконт“ применяется РВП с опорным винтом (рис. 1) [2]. Особенность такой конструкции заключается в отсутствии смещения роликов (2) относительно винта (3) при функционировании передачи. Вращательное движение электродвигателя передается на гайку РВП (1), которая совершает только вращательное движение. При вращении гайки РВП ролики совершают планетарное движение и смещаются совместно с винтом (3) в осевом направлении. Винт жестко связан с выходным штоком (4) и сообщает последнему осевое перемещение [3].

С целью сокращения сроков конструкторской подготовки производства в АО „Диаконт“ была разработана САПР РВП, обладающая следующими возможностями [4—6]: 1) синтез оптимальной геометрии передачи с заданными параметрами; 2) расчет контакта витков резьбы, определение напряжений и деформаций; 3) расчет грузоподъемности и ресурса; 4) расчет кинематической точности; 5) расчет осевой жесткости, осевого люфта и

упругого мертвого хода; б) расчет КПД, потерь на трение качения и трение скольжения; 7) расчет на износостойкость.

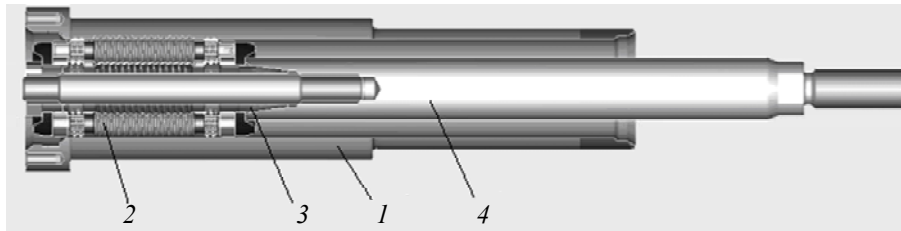


Рис. 1

Гайка РВП является наиболее трудоемкой и ответственной деталью конструкции. Специальная внутренняя резьба детали должна быть выполнена с высокой степенью геометрической точности, что может обеспечить высокопроизводительный способ вихревого нарезания резьбы [7]. Требуемые ресурс, грузоподъемность и кинематическая точность на протяжении всего жизненного цикла ЭМП определяются физико-механическими характеристиками поверхностно упрочненного слоя. Наиболее эффективным способом поверхностного упрочнения внутренней резьбовой поверхности гайки РВП является ионно-плазменное азотирование (ИПА). Освоение технологии серийного изготовления деталей с применением ИПА позволит значительно сократить себестоимость изготовления и повысить конкурентоспособность конечного продукта — ЭМП нового поколения.

В настоящей статье рассматривается процесс освоения технологии ИПА внутренней резьбовой поверхности гайки РВП.

Первый опыт азотирования резьбовых поверхностей. В процессе функционирования РВП нагрузки воспринимаются боковыми поверхностями резьбы контактирующих деталей, САПР РВП позволяет проводить расчет напряжений в контакте резьбовых поверхностей [8]. На основании требований к ресурсу и грузоподъемности передачи в САПР РВП проводятся прочностные расчеты по критериям контактной выносливости и малоциклового усталости, в результате которых определяются минимальные требуемые характеристики упрочненного слоя, представленные в форме зависимости твердости от расстояния до поверхности контакта.

При определении параметров упрочненного слоя резьбовых поверхностей наибольший интерес представляет зависимость твердости от расстояния до поверхности для боковой поверхности резьбы в зоне ее среднего диаметра, которая соответствует номинальному расположению точки начального контакта резьбовых поверхностей до приложения рабочей нагрузки. Таким образом, измерение микротвердости выполняется по нормальям к боковым поверхностям резьбы в зоне среднего диаметра.

Задача азотирования резьбовых поверхностей трудна, многогранна и мало изучена. Анализ литературных источников показал, что, как правило, резьбовые поверхности деталей машин не азотируются, поскольку это увеличивает хрупкость резьбы. В связи с этим первые опыты по азотированию проводились на основании данных о применении технологии ИПА для типовых поверхностей деталей машин — цилиндрических и конических наружных поверхностей, а также зубчатых венцов с модулем $m > 1$ [9].

Крайне важен анализ микроструктуры поверхностей после ИПА. Контроль микроструктуры проводится посредством травления металлографического шлифа. В первых опытах применялась низкоуглеродистая низколегированная сталь для азотирования, содержащая 2 % хрома и 0,5 % молибдена. Основной этап цикла азотирования, на котором поверхностные слои заготовки насыщаются азотом, длился 24 ч и проводился при температуре 550 °С. На рис. 2 приведены зависимости микротвердости H от расстояния до поверхности l и микроструктура после травления трехпроцентным раствором „Нитал“.

Первые полученные результаты оказались неудовлетворительными, поскольку крупнозернистая структура также способствует формированию замкнутой нитридной сетки и снижению толщины азотированного слоя, а следовательно и производительности обработки [10].

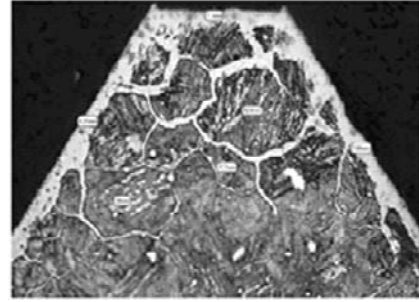
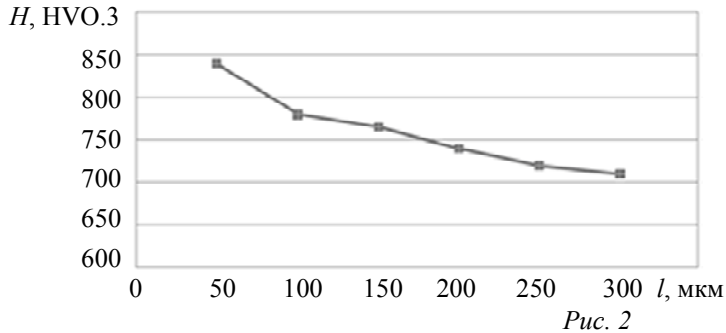
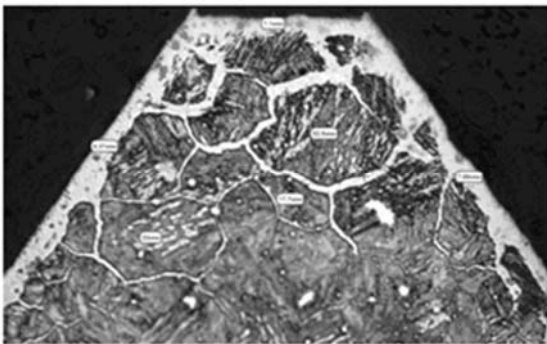


Рис. 2

Оптимизация процесса азотирования резьбовых поверхностей. Анализ специальной литературы и экспериментальная проработка позволили выявить основные факторы, оказывающие влияние на параметры упрочнения. Поверхностная твердость деталей зависит от параметров режима азотирования (температура, длительность основного процесса, соотношение и состав рабочих газов в камере печи, частота импульсов и перерывов между импульсами, давление в камере установки), химического состава конструкционного материала, предварительной термической обработки.

Корректировка режимов ИПА и модификация режимов предварительной термической обработки позволили достичь определенных успехов: проращение нитридной сетки наблюдается только на пересечении боковой поверхности и вершины резьбы (глубина проникновения сетки не превышает 100 мкм), толщина диффузионного слоя была существенно снижена, на поверхности формируется слой соединений с допустимой толщиной 3—5 мкм. В настоящей работе не приведены детальное описание проведенных опытов и выявленных закономерностей, представлены лишь конечные результаты данного этапа освоения технологии ИПА. На рис. 3 представлены результаты корректировки режимов азотирования на низкоуглеродистой стали с 2 % Сг и 0,5 % Мо, основная стадия 550 °С (а — 24, б — 4 ч).

а)



б)

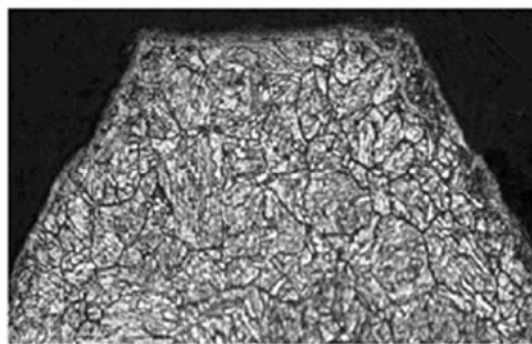


Рис. 3

Замена конструкционного материала. Поверхностная твердость изначально выбранного материала остается высокой после оптимизации параметров процесса и не может быть снижена за счет изменения параметров ИПА. Известно, что химический состав стали оказывает прямое влияние на твердость поверхности после упрочнения. На основании вышеприведенных данных изначально выбранный конструкционный материал был заменен среднеуглеродистой низколегированной конструкционной сталью, содержащей 1 % хрома и 0,2 % молибдена. Была выполнена тестовая обработка образцов из двух конструкционных материалов в одной садке. На конструкционном материале с пониженным содержанием хрома и молибдена поверхностная твердость была снижена на 120 HVO.3 при достаточной толщине упрочненного слоя. На рис. 4 проиллюстрировано влияние химического состава материала на

результаты ИПА, основная стадии процесса проводилась при 550 °С (4 ч): 1 — изначально выбранный материал (0,2 % С; 2 % Cr; 0,5 % Мо), 2 — новый материал (0,4 % С; 1 % Cr; 0,2 % Мо).

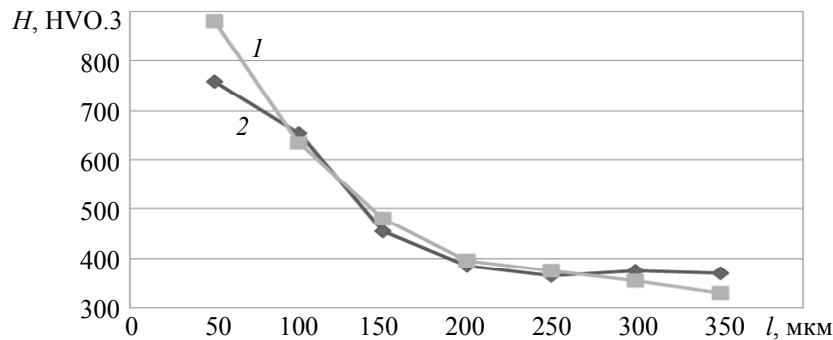


Рис. 4

Влияние предварительной термической обработки на результаты азотирования.

Предварительная термическая обработка заготовок оказывает существенное влияние на результаты азотирования. При выборе нового конструкционного материала учитывалось отсутствие тенденции к росту зерна стали при нагреве.

Наличие крупнозернистой структуры заготовки приводит к снижению твердости и глубины диффузионного слоя, что подтверждается проведенными опытами (рис. 5, размер зерна по шкале ASTM E112: 1 — 5,2; 2 — 7,5).

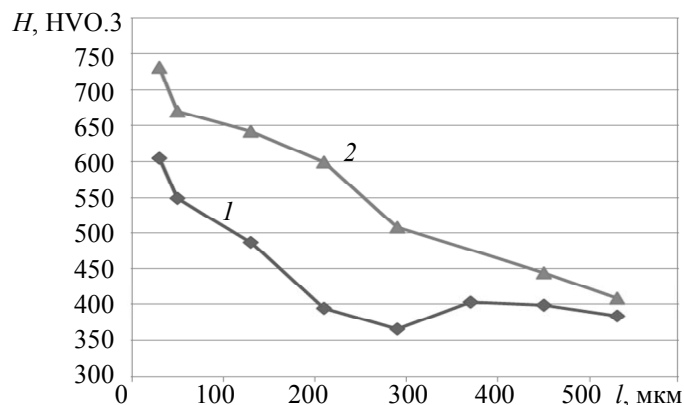


Рис. 5

В одной садке азотировались заготовки с крупнозернистой и мелкозернистой структурой. Крупнозернистая структура была сформирована в процессе предварительной термической обработки при длительной выдержке выше температуры аустенизации, что привело к росту зерна в процессе азотирования даже у стали. Следует отметить, что объемная твердость заготовок до азотирования составляла 350—370 HV. Формирование нитридной сетки имеет место на обоих образцах, что связано с длительной выдержкой на основном этапе азотирования. Однако более интенсивно нитридная сетка формируется на образце с крупнозернистой структурой. Таким образом, глубина упрочненного слоя и микроструктура стали после азотирования напрямую зависят от исходного размера зерна стали. На основании полученных опытных данных и типовых характеристиках среднелегированных сталей было сформулировано требование о применении для азотирования заготовок с размером мартенситного зерна стали не менее 7 по ASTM E112.

При проектировании технологического процесса изготовления гаек РВП особое внимание следует уделить отработке режимов предварительной термообработки. Помимо требований к мелкозернистой структуре заготовки важно получить однородную структуру. При термообработке низко- и среднелегированных сталей часто возникают такие дефекты термической

обработки, как неполная закалка, которые могут быть связаны с недогревом стали или недостаточной интенсивностью охлаждения при закалке. Неоднородная структура стали перед азотированием негативно влияет на стабильность результатов азотирования и размеров деталей после ИПА [11]. При получении нестабильных результатов азотирования, которые характеризуются точечными вылетами значений микротвердости после азотирования, был проведен количественный анализ микроструктуры. У образцов с выявленными после азотирования отклонениями по твердости наблюдалась неоднородная микроструктура с включениями неотпущенного мартенсита. Был проведен мультифазный анализ образцов с применением оптического микроскопа Zeiss Axio.Vert A1. Анализ показал, что содержание неотпущенного мартенсита достигало 20 %, в то время как мультифазный анализ образцов с однородной структурой продемонстрировал, что концентрация неотпущенного мартенсита не превышает 5 %. Для заготовок деталей, подвергающихся ИПА, в технической документации следует задать дополнительное требование по однородности микроструктуры после операций предварительной термической обработки (закалки и отпуска). Для низколегированных сталей содержание неотпущенного мартенсита не должно превышать 10 %.

Известно, что температура отпуска во время предварительной термообработки должна превышать температуру последующей операции азотирования на 40—70 °С, это позволит исключить влияние фазовых превращений сердцевинной заготовки на качество азотирования. Таким образом, для исключения поводков в процессе азотирования, а также для того, чтобы объемная твердость заготовок оставалась неизменной, температура отпуска заготовок не должна быть ниже 550 °С.

Основными требованиями к предварительной термической обработке заготовок из низко- и среднелегированных сталей являются минимизация времени выдержки при повышенных температурах и обеспечение требуемой интенсивности охлаждения при закалке. В зависимости от габаритных размеров деталей могут потребоваться плавка стали с легированием на верхнем пределе, более интенсивное охлаждение заготовок в среде водного полимера или в воде после закалки. Эти мероприятия должны сопровождаться контролем качества с помощью ультразвука и вихревых токов, что позволит гарантировать отсутствие внутренних и поверхностных дефектов заготовок.

Модификация режима ИПА. Проведение вышеописанных мероприятий позволило преодолеть основные проблемы, которые изначально затрудняли применение технологии ИПА для резьбовых поверхностей. Поверхностная твердость полученных заготовок была несколько выше значений, требуемых для функционирования передачи, что позволило провести опыты по частичной деазотации заготовок. Применение этого приема позволяет удалить из поверхностного слоя заготовки несвязанный азот при одновременной диффузии азота в глубь заготовки. Деазотация, которая фактически является отпуском заготовок, позволяет снизить поверхностные напряжения — это обязательное требование для деталей, работающих при высоких контактных нагрузках. Проведенные опыты показывают, что при температуре отпуска 630 °С как слой соединений, так и диффузионный слой полностью „выгорают“ с поверхности заготовки. Для повышения производительности процесса деазотации был выбран режим с выдержкой в течение 45 мин при 550 °С. Следует отметить, что проведение деазотации возможно в установке для ИПА в одном цикле с основным процессом. Частичная деазотация при 550 °С в течение 45 мин привела к снижению поверхностной твердости с 760 до 610 НВО.3 и к увеличению общей глубины азотированного слоя до 0,25 мм. После проведения ИПА по спроектированному режиму получена зависимость микротвердости от расстояния до поверхности с плавным градиентом (рис. 6, 1 — 550, 2 — 580, 3 — 630 °С).

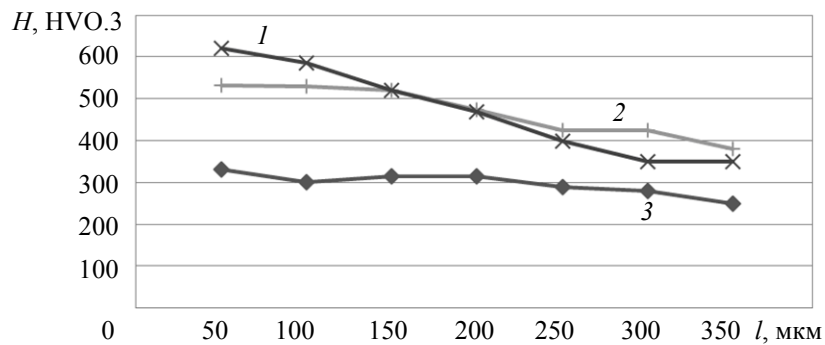


Рис. 6

Результаты и дальнейшие перспективы. В результате комплексной оптимизации ИПА разработан технологический процесс, позволяющий получать детали с азотированными резьбовыми поверхностями, которые успешно функционируют в высоконагруженной РВП. Выявлены основные факторы, оказывающие влияние на результаты азотирования. Применение технологии ИПА для резьбовых поверхностей стало возможным за счет получения требуемых характеристик деталей: 1) мелкозернистая равномерная структура материала по всему объему детали; 2) соответствие графика „микротвердость — расстояние от поверхности“ требованиям САПР РВП; 3) сниженная за счет выбора подходящего конструкционного материала и режимов ИПА хрупкость деталей; 4) отсутствие в диффузионном слое замкнутой нитридной сетки; 5) толщина слоя соединений на боковой поверхности резьбы не превышает 5 мкм.

Гайка РВП с полученными характеристиками азотированного слоя была установлена в образец ЭМП для проведения ресурсных испытаний. Испытания завершились успешно, фактический ресурс ЭМП составил 2700 ч, что в 5,6 раза превышает пороговое целевое значение [12].

В результате проведения комплекса работ принципиально подтверждена возможность азотирования резьбовых поверхностей. Применение ИПА позволит существенно сократить себестоимость изготовления ответственных деталей РВП без ущерба для характеристик РВП и ЭМП в целом.

В силу особенностей азотирования резьбовых поверхностей в дальнейшем планируется продолжить освоение технологии. Актуальность задачи связана с большой номенклатурой ЭМП в производственной линейке, а также с необходимостью разработки новых устройств на базе РВП и роликовинтовых редукторов [13]. Не только конструкционный материал и параметры режима азотирования влияют на характеристики упроченного слоя, но и геометрия деталей. Интенсивность насыщения поверхностных слоев детали азотом различна для деталей с разным профилем резьбы. При совместном азотировании деталей с разными профилями на детали с малой шириной притупления резьбы формируется замкнутая нитридная сетка, в то время как на детали с большим притуплением формирования нитридной сетки не наблюдается. Важно отметить, что модификация резьбы гайки РВП требует также изменения резьбы на роликах и винтах, что позволит избежать кромоочного контакта при функционировании передачи [14].

Таким образом, исходя из массогабаритных и геометрических характеристик деталей (количество заходов резьбы, шаг, профиль резьбы в осевом сечении), а также зависимости требований по прочности от конкретных условий применения необходимо разработать универсальную методику проектирования технологических процессов для резьбовых деталей, это позволит избежать проведения НИОКР перед запуском каждого нового изделия в производство [15]. Создание базы знаний для проектирования технологических процессов изготовления ответственных резьбовых деталей РВП позволит значительно сократить сроки освоения производства новых изделий и расходы на технологическую подготовку производства.

Статья написана при выполнении НИОКТР „Создание высокотехнологичного производства высокомоментных малогабаритных роликвинтовых редукторов, обеспечивающих импортозамещение и повышение конкурентоспособности в наукоемких отраслях промышленности (станкостроительная, авиастроительная, судостроительная, электротехническая, нефтегазовая, энергетическое машиностроение)“ в Университете ИТМО, при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 „О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иваненко А. О., Уваров М. М. Оптимизация параметров технологической операции токарной обработки деталей типа „ВАЛ“ с целью снижения себестоимости изделия // Перспективы науки. 2014. Т. 62, № 11. С. 117—123.
2. Aleksanin S. A., Puctozarov R. V., Fedosovskii M. E. Use of numerical method for determination of contact points position in roller screw threads // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015. Vol. 12, N 1. P. 721—730.
3. Пустозеров Р. В. и др. Особенности разработки роликвинтовых передач в составе линейных актуаторов // Науч. вестн. Костромского гос. техн. ун-та. 2013. Т. 1, № 2. С. 17—29.
4. Егоров И. М., Алексанин С. А., Федосовский М. Е. и др. Математическое моделирование погрешностей изготовления элементов цевочной передачи планетарного редуктора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6(94). С. 171—177.
5. Егоров И. М., Алексанин С. А., Федосовский М. Е., Птицына А. С. Влияние погрешностей элементов механизма параллельных кривошипов на кинематическую точность планетарного цевочного редуктора // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 10. С. 76—80.
6. Fedosovskii M. E., Aleksanin S. A., Egorov I. M. et al. The Effect of a Cycloid Reducer Geometry on its Loading Capacity // World Applied Sciences J. 2013. Vol. 24, N 7. P. 895—899.
7. Иваненко А. О. Изготовление ответственных резьбовых поверхностей методом вихревого нарезания резьбы (вихревого фрезерования) // Сб. тез. докл. V Всерос. конгр. молодых ученых „Информационные и интеллектуальные системы и технологии. Системы и технологии техногенной безопасности“. 2015 [Электронный ресурс]: <<http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/1022/1022.pdf>>.
8. Дунаев В. И., Егоров И. М., Тулькова И. А. и др. Определение точек контакта резьбовых деталей планетарной роликвинтовой передачи // Наука и бизнес: пути развития. 2015. № 11 (53). С. 15—22.
9. Husson R., Baudouin C., Bigot R. Consideration of residual stress and geometry during heat treatment to decrease shaft bending // Intern. J. Advanced Manufacturing Technologies. 2014. N 72. P. 1455—1463.
10. Stepniak M., Walkowicz J., Jurczyszyn R. Selected Plasma Nitriding Methods Usable for Thermo-Chemical Treatment OF Aircraft Parts // J. of KONES Powertrain and Transport. 2014. N 21. P. 145—152.
11. Depouhon P., Sparuel J. M., Mermoz E. Prediction of residual stresses and distortions induced by nitriding of complex 3D industrial parts // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2015. N 64. P. 553—556.
12. Магдиев Р. Р., Уваров М. М. Алгоритм отработки технологии изготовления детали роликвинтовой передачи на токарном автомате „швейцарского“ типа // Металлообработка. 2014. Т. 82, № 4. С. 45—49.
13. Korobeynikov A. G., Fedosovsky M. E., Maltseva N. K. et al. Use of Information Technologies in Design and Production Activities of Instrument-Making Plants // Indian J. of Science and Technology. 2016. Vol. 9, N 44. P. 104708—104716.
14. Магдиев Р. Р., Уваров М. М., Потанов А. В. Технологическая подготовка изготовления сложной геометрии на современном приборостроительном предприятии // Металлообработка. 2013. Т. 75, № 3. С. 40—46.
15. Korobeinikov A. G., Fedosovsky M. E., Zharinov I. O. et al. Development of Conceptual Modeling Method to Solve the Tasks of Computer-Aided Design of Difficult Technical Complexes on the Basis of Category Theory // Intern. J. of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12, N 6. P. 1114—1122.

- Александр Олегович Иваненко** — *Сведения об авторах* аспирант; Университет ИТМО; кафедра систем и технологий техногенной безопасности (базовая); E-mail: ivanenkoa1991@gmail.com
- Ирина Анатольевна Тулькова** — АО „Диаконт“, дивизион серийной приводной техники; директор дивизиона; E-mail: tulkova@diakont.com
- Михаил Михайлович Уваров** — Университет ИТМО; кафедра систем и технологий техногенной безопасности (базовая); старший преподаватель; E-mail: uvarov@diakont.com

Поступила в редакцию
14.09.17 г.

Ссылка для цитирования: Иваненко А. О., Тулькова И. А., Уваров М. М. Технологические особенности азотирования резьбовых поверхностей ответственных деталей электромеханического привода // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 4. С. 360—367.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF NITROGENING THREAD SURFACES OF CRITICAL PARTS OF ELECTROMECHANICAL DRIVE

A. O. Ivanenko¹, I. A. Tulkova², M. M. Uvarov¹

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: ivanenko@diakont.com

²Diakont JSC, 198517, St. Petersburg, Russia

The process of internal thread surface ion-plasma nitriding of nut, which is a part of nut-roller screw, is considered. Ion-plasma nitriding is used to harden the surface layer of a part after machining, this allows to obtain a surface of the required quality without additional grinding required when traditional methods of bulk hardening are applied. Technological regimes are selected, and additional requirements are imposed on the workpiece material during nitriding of threaded surfaces that, as a rule, are not subjected to surface hardening treatment. The complex of developed constructive and technological measures provides the resource of the roll-screw transmission more than five times higher than that of the models presented in the world market, with a significant reduction in the cost of production due to the elimination of long and expensive grinding processing from the technology.

Keywords: nut roller screw, electromechanical actuator, ion-plasma nitriding, thread surface

Data on authors

- Alexander O. Ivanenko** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Technogenic Security Systems and Technologies; E-mail: ivanenkoa1991@gmail.com
- Irina A. Tulkova** — Diakont JSC, Department of serial drive technology; Director of the Department; E-mail: tulkova@diakont.com
- Mikhail M. Uvarov** — ITMO University, Department of Technogenic Security Systems and Technologies; Senior Lecturer; E-mail: uvarov@diakont.com

For citation: Ivanenko A. O., Tulkova I. A., Uvarov M. M. Technological features of nitrogening thread surfaces of critical parts of electromechanical drive. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 4. P. 360—367 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-360-367