

УДК 621.7.075

doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-25-37

Обработка резьбы инструментом с осевым колебанием резьбообразующих профилей

О.В. Мальков, Л.Д. Малькова, Д.И. Волотов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Thread Processing with a Tool with Axial Oscillation of Thread Forming Profiles

O.V. Malkov, L.D. Malkova, D.I. Volotov

Bauman Moscow State Technical University

Предложен способ планетарного раскатывания резьбы сборным инструментом с колебанием резьбообразующих поверхностей, который обеспечивает получение резьбы в алюминиевом сплаве АМг6М с профилем, соответствующим профилю метрической резьбы. Разработана опытная конструкция сборного инструмента с возможностью углового регулирования двух дисков. Проведены исследования влияния угла смещения дисков относительно друг друга на силу, возникающую при планетарном раскатывании резьбы, и микротвердость ее боковых сторон. Определен угол смещения дисков, обеспечивающий минимальную силу при раскатывании. Выполнено сравнение микротвердости боковых сторон резьбы, полученной резьбофрезерованием и планетарным раскатыванием с использованием дисков без колебания и с колебанием резьбообразующих поверхностей. Результаты исследования могут быть полезны конструкторам при проектировании деформирующих резьбообразующих инструментов и технологам для оценки возможности использования планетарного раскатывания резьбы.

Ключевые слова: формообразование резьбы, метрическая резьба, планетарное раскатывание резьбы, резьбообразующий инструмент, колебание резьбообразующих поверхностей

A method for planetary thread rolling with a prefabricated tool with oscillation of the thread-forming surfaces is proposed. It indicates the possibility of obtaining a thread in an aluminum alloy АМg6М with a profile corresponding to the profile of a metric thread. An experimental design of a prefabricated tool with the possibility of angular adjustment of two disks has been developed. The influence of the disk displacement angle relative to each other on the force during planetary thread rolling and the microhardness of its lateral sides was carried out. The value of the disc offset angle is set, which provides the minimum force during rolling. A comparison was made of the microhardness of thread flanks obtained by thread milling and planetary rolling using disks without oscillation and with oscillation of thread forming surfaces. The research results could be useful for designers in the design of deforming thread forming tools and for technologists in the assess process of the possibility of using planetary thread rolling.

Keywords: thread shaping, metric thread, planetary thread rolling, thread forming tool, oscillation of thread forming surfaces

Резьбовые соединения получили широкое распространение в изделиях машиностроительного производства. Применяемые в них резьбы

различаются по назначению (крепежные, ходовые, регулировочные и герметичные), что предопределяет не только их геометрические

параметры и точность, но и эксплуатационные свойства (надежность, износостойкость, прочность и пр.).

Многokратное использование резьбы, абразивные среды и циклическое нагружение приводят к снижению ее эксплуатационных свойств. Для увеличения ресурса резьбы используют различные способы повышения ее эксплуатационных свойств (рис. 1) [1–25].

При отделочно-деформирующей обработке резьбы повышаются ее точность, коррозионная

стойкость, сопротивление усталости [14] и стойкость резбонакатного инструмента, снижается шероховатость резьбы, создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения [15–17] и отсутствует стружка.

При таком способе получения резьбы обрабатывают как весь профиль [5, 7], так и отдельно боковую поверхность [6, 8, 21, 22]. В технологии изготовления резьбы с повышенными эксплуатационными свойствами можно использовать пластическое деформирование как

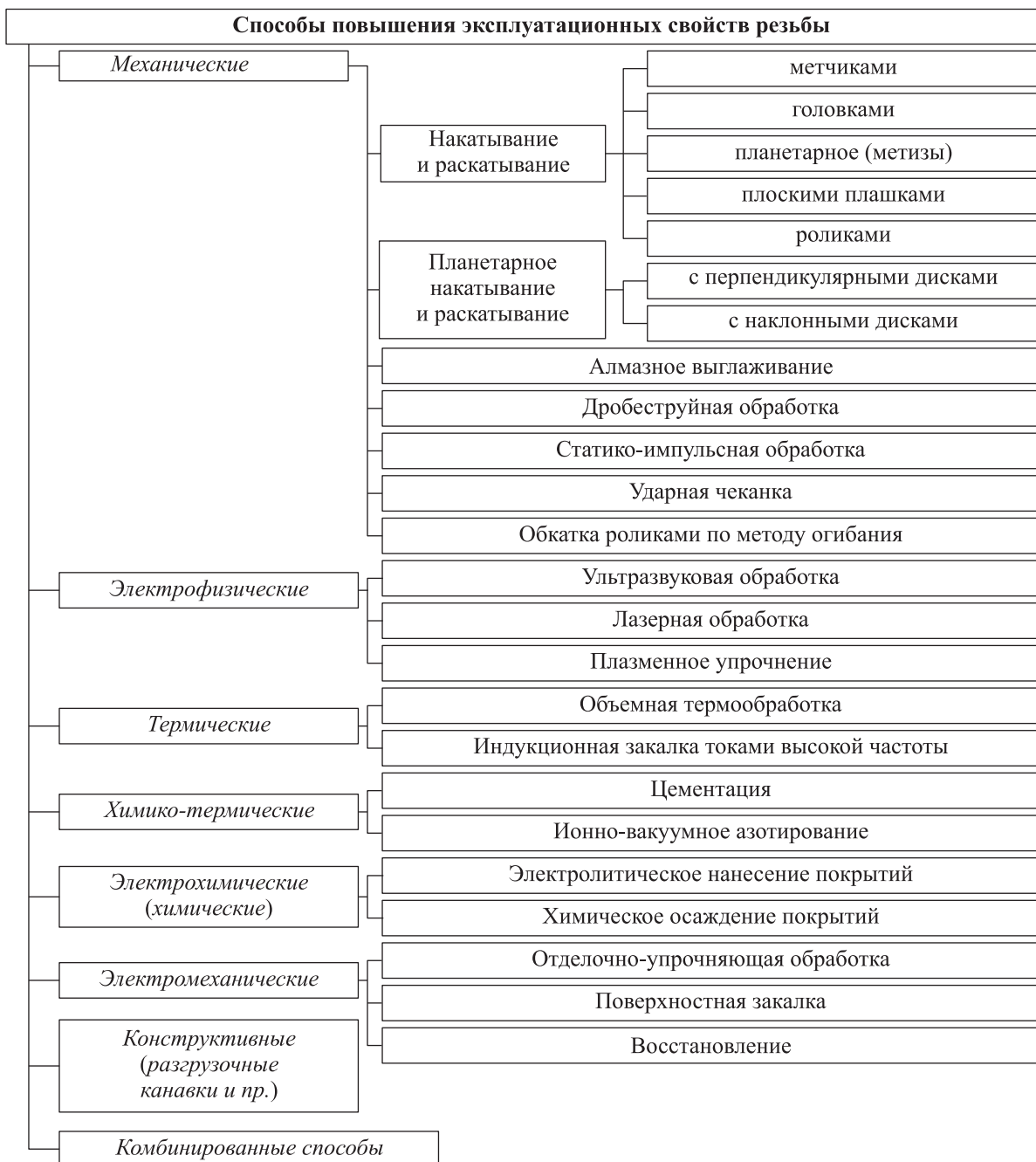


Рис. 1. Классификация способов повышения эксплуатационных свойств резьбы

монооперацию или деформирующие операции после обработки резанием.

Лазерное упрочнение резьбы позволяет увеличить ее циклическую прочность, износостойкость и антифрикционные свойства вследствие возникновения сжимающих остаточных напряжений и повышения микротвердости поверхностного слоя в режимах упрочнения без оплавления поверхности [3].

Основными достоинствами лазерного упрочнения являются минимальная деформация, возможность точно устанавливать режимы и глубину упрочнения, а также глубину прогрева и, как следствие, управлять деформациями [3]. Лазерное упрочнение резьбы имеет перспективы развития и находится на стадии опытного апробирования и внедрения в производственные процессы.

В работе [20] исследован метод лазерной закалки резьбовой части насосно-компрессорных труб для повышения ее износостойкости, которую оценивали числом циклов свинчивания-развинчивания без потери герметичности резьбового соединения. Лазерная закалка резьбы на патрубках из стали 38Г2С позволила увеличить число циклов соединения до 20 (для резьбы после механической обработки до 6).

Ионно-вакуумное азотирование успешно применяют в упрочнении резьбовой поверхности замков насосно-компрессорной трубы, что позволяет увеличить их число свинчивания-развинчивания [4]. Исследованы варианты повышения эксплуатационных свойств методами поверхностного пластического деформирования, плазменного и химико-термического упрочнения, ультразвуковой прокатки [11].

При использовании буровых установок для проходки горных выработок и очистной выемки (перфораторами или станками вращательно-ударного бурения) из-за неровности поверхности забоя возникают поломки буровых штанг по резьбе. Это вызывает очень высокие напряжения изгиба бурового инструмента и относительную динамическую подвижность сопрягаемых резьбовых поверхностей [5].

Вследствие сложного динамического ударно-вращательного нагружения резьбовых соединений *муфта перфоратора — штанга* и *штанга — буровая головка* происходит пластическая деформация резьбовых поверхностей из-за высоких контактных напряжений, переупрочнение поверхностного слоя и, как следствие, усталостное выкрашивание поверхно-

стей резьбы. Чтобы снизить износ и облегчить отвинчивание высоконагруженных элементов, используют круглую или кругло-упорную резьбу по ГОСТ 17196–77.

Конструкция оправки для алмазного выглаживания такой резьбы на токарно-винторезном станке [5] позволила улучшить ее эксплуатационные свойства. В результате для шведской стали Sanbar 61 достигнута микротвердость 1000 кг/мм² и существенное снижение шероховатости, что повысило стойкость штанг с 600 до 800...850 шпурометров.

В работе [6] приведены результаты дробеструйной обработки боковых поверхностей резьбы М10 (материал — сталь 12Х18Н9) без упрочнения впадин за счет использования диаметра дроби большего, чем радиус впадины резьбы на пневмодробеструйной установке со щелевым соплом при давлении воздуха $p = 0,6$ МПа. Для резьбовых деталей, работающих при повышенной температуре, упрочнение без наклепа дна впадин резьбы является рациональным, так как наклеп в опасном сечении детали снижает сопротивление усталости [6].

В статье [9] предложен способ статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием, заключающийся в периодическом импульсном воздействии на нагружаемую поверхность бойком через статически нагруженный волновод. Такой способ можно рекомендовать для повышения эксплуатационных свойств тяжело нагруженных деталей машин (в частности, тяжело нагруженных резьб в заготовках из цветных металлов и сплавов, чугуна и стали твердостью до 58...64 HRC), разрушение поверхностного слоя которых происходит вследствие циклических нагрузок.

В работе [10] рассмотрена возможность применения обкатки бочкообразными роликами витков крупномодульных червяков и трапецеидальных резьб по методу огибания к ходовому винту станка 16К20, имеющему трапецеидальную резьбу Tr 44x12.

Обкатывание резьбы роликом с наложением ультразвуковых колебаний позволяет снизить шероховатость и сжимающие остаточные напряжения на поверхности резьбы, что увеличивает ее сопротивление усталости [12].

Для повышения прочности резьбы штоков поршневых компрессоров применяют статико-импульсную отделочно-упрочняющую обработку радиуса ее впадины пластическим деформированием. При испытаниях заготовку из

стали 40ХНМ2А твердостью 226...253 НВ с резьбой М90×4 закрепляли в патроне токарного станка 1М63Н.

В резцедержателе размещали генератор механических импульсов (отбойный молоток с частотой импульсов 4200 мин⁻¹ и энергией удара 3,1 Дж). Резьбонакатное кольцо — с тремя роликами диаметром 32 мм и цапфой диаметром 9 мм из стали ХВГ с углом профиля 55° и радиусом у вершины 0,58 мм. Частота вращения шпинделя станка — 10 мин⁻¹, подача — 4 мм/об [13].

После обработки размеры резьбы соответствовали точности 6g, шероховатость поверхности резьбы *Ra* составила 0,2 мм, глубина упрочненного слоя — 0,25 мкм, увеличение микротвердости и прочности наклепанного слоя в среднем — 25 %.

Электромеханическую обработку резьбы подразделяют на отделочно-упрочняющую электромеханическую обработку, электромеханическую поверхностную закалку и электромеханическое восстановление [18, 19]. Высокая эффективность отделочно-упрочняющей электромеханической обработки связана с одновременным поверхностным пластическим деформированием и поверхностной закалкой резьбы, осуществляемой электроконтактным воздействием инструмента и резьбы.

Электромеханическая обработка резьбы позволяет повысить ее усталостную прочность, уменьшить абразивный износ и пластическую деформацию витков резьбы благодаря увеличению микротвердости поверхности резьбы при сохранении вязкой сердцевины витков, отсутствию окисления и обезуглероживания поверхностного слоя, получению волокон металла, вытянутых вдоль профиля резьбы, оптимальной микрогеометрии поверхности и мелкодисперсной мартенситной структуры.

Согласно ГОСТ Р 54383–2011, для уменьшения заедания при свинчивании–развинчивании замков на поверхность резьбы наносят специальное покрытие (фосфатное, медное и др.).

Как видно из рис. 1, большая часть способов повышения эксплуатационных свойств резьбы относится к механическому воздействию на обрабатываемую поверхность.

Цель работы — повышение эффективности планетарного раскатывания резьб сборным инструментом с осевым колебанием резьбообразующих элементов, что позволит расширить диапазон диаметров обработанной резьбы за

счет снижения силы резьбообразования вследствие уменьшения площади контакта инструмента с заготовкой и увеличить микротвердость боковых сторон резьбы.

Применение планетарного раскатывания особенно актуально для материалов, обработка резанием которых осложнена высокой пластичностью и вязкостью, что приводит к затруднению стружкообразования и стружкоотвода, снижает надежность резьбонарезного инструмента. К таким материалам относятся технически чистая медь и низколегированные сплавы меди, а также технически чистый алюминий и деформируемые сплавы алюминия.

Проведен анализ деформирующих бесстружечных метчиков таких производителей, как Guhring Inc., CERATIZIT Group, REIME NORIS GmbH, Emuge Corporation, Dormer Pramet и ООО «СТАМО Тулс». Установлено, что эти производители серийно выпускают инструменты в диапазоне диаметра 2...24 мм и шага 0,5...3 мм для обработки резьб (метрических, унифицированных дюймовых, трубных, электротехнических, трапецеидальных, круглых).

В качестве обрабатываемых материалов выступают низкоуглеродистые и низколегированные конструкционные стали, автоматные стали; ферритные, мартенситные и аустенитные нержавеющие стали, технически чистый алюминий, деформируемые и литейные сплавы алюминия, технически чистая медь, низколегированные сплавы меди, медно-цинковые сплавы, высокопрочный чугун с шаровидным графитом, технически чистый титан и сплавы на его основе, технически чистый никель и его сплавы.

Планетарное раскатывание позволяет использовать одновременно достоинства кинематической схемы резьбофрезерования и бесстружечных метчиков, что существенно расширяет диапазон диаметров резьбы для обрабатываемых материалов. К достоинствам планетарного раскатчика относятся:

- отсутствие стружки, а следовательно, необходимости ее удаления;
- легкость извлечения инструмента из обрабатываемого отверстия в случае его поломки;
- отсутствие необходимости повышения крутящего момента для вращения инструмента при увеличении диаметра обрабатываемой резьбы;
- универсальность (одним инструментом можно получать резьбы разного диаметра и одного шага);

- отсутствие кинематической связи частоты вращения инструмента с шагом резьбы, что позволяет назначать необходимую скорость главного движения для обеспечения обработки с заданной производительностью;

- возможность использования стандартного вспомогательного инструмента (как для обычных фрез);

- отсутствие необходимости в реверсе шпинделя, что снижает вспомогательное время обработки;

- более высокая подача инструмента, чем у резьбовых фрез (на 30...40 %) и бесстружечных метчиков (на 60 % согласно данным Dormer Pramet);

- образование в материале детали остаточных напряжений сжатия, что улучшает эксплуатационные свойства резьбы.

В целях повышения эффективности обработки резьбы пластическим деформированием предложены способ и инструменты для планетарного накатывания резьбы с осевым колебанием формообразующей поверхности [23, 24].

Такой инструмент включает в себя рабочую часть 1, предназначенную для обеспечения процесса резьбообразования (рис. 2, а), и крепежную (хвостовую) часть 2, с помощью которой его закрепляют на станке. Рабочая часть может иметь несколько исполнений, каждое из которых обладает преимуществами перед другими конструкциями, расширяя технологические возможности инструмента.

Наиболее простой вариант конструкции рабочей части, где она выполнена в виде формообразующего диска (ФОД), расположенного на торце цилиндрической шейки, приведен рис. 2. Особенностью ФОД является его колебательное (волнообразное) движение при раскатывании резьбы. Этот эффект достигается тем, что формообразующая поверхность ФОД получается в результате перемещения образующего контура по эллиптической направляющей.

Образующий контур представляет собой резьбовой профиль, угол β которого соответствует формируемой резьбе, а ширина вершины a несколько меньше, чем у впадины основного профиля резьбы (рис. 2, б). Эллиптическая направляющая, по которой перемещается образующий контур, является сечением цилиндрической поверхности плоскостью, расположенной под углом $(90^\circ - \psi)$ к ее оси.

В предложенной конструкции ФОД визуально воспринимается как наклоненный к оси инструмента на некоторый угол, однако его наружная поверхность диаметром d является цилиндрической и концентричной базовой цилиндрической поверхности на хвостовике. Конфигурация ФОД определяет процесс раскатывания резьбового профиля.

Схема планетарного раскатывания резьбы приведена на рис. 3. Главным движением формообразования D_r является вращение инструмента вокруг своей оси. Кроме того, он получает планетарное движение подачи, которое

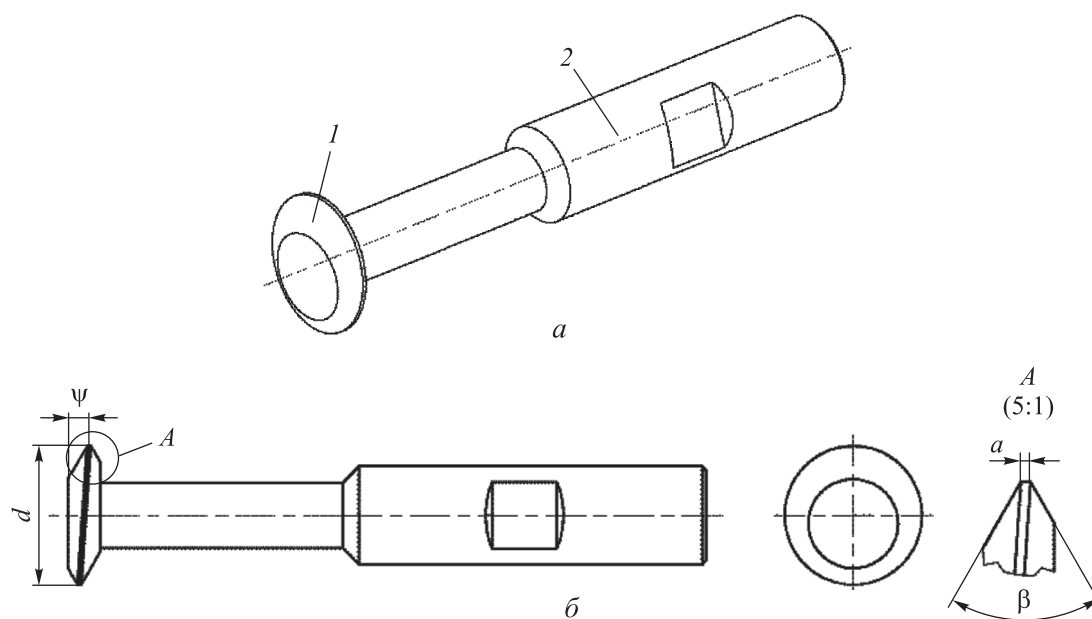


Рис. 2. Конструктивные схемы неразъемного планетарного раскатника с одним ФОД

включает в себя вращение D_s вокруг оси обрабатываемой резьбы и перемещение $D_{и}$ вдоль ее оси.

Две составляющие движения подачи согласованы так, что за один планетарный оборот раскатчик перемещается вдоль оси на один шаг обрабатываемой резьбы. При этом инструмент обеспечивает колебательное движение формообразующей поверхности ФОД вдоль оси резьбы (рис. 3, а). Это позволяет эффективнее воздействовать на материал и раскатывать резьбовой профиль с меньшими суммарными усилиями.

Этапы формообразования элементов резьбы — последовательные положения профиля ФОД внутри номинального профиля раскатываемой резьбы (в результате поворота ФОД на 180° вокруг оси) — показаны на рис. 3, б. Здесь сначала ФОД занимает некоторое начальное положение, когда контактирует с верхней боковой стороной резьбы, затем после поворота на 90° образующий профиль оказывается в середине номинального, и далее после еще одного поворота на 90° ФОД контактирует с нижней стороной резьбы.

Так как скорость главного движения формообразования значительно превышает ско-

рость движения подачи, формообразующий профиль ФОД многократно совершает описанные колебания внутри создаваемой резьбы, которые способствуют образованию наклепа и снижению силы при обработке.

Использование n -гранных дисков, имеющих три грани и более, делает конструкцию менее технологичной, но позволяет снизить момент резьбообразования (рис. 4, а).

Рассмотренная конструкция с одним ФОД на торце инструмента является наиболее универсальной, так как позволяет использовать раскатчик для создания резьб различного диаметра с разным шагом, что достигается кинематическим согласованием планетарного и осевого движений подачи. В то же время производительность такого инструмента не может быть высокой, поскольку все витки формируемой резьбы должны быть обработаны последовательно одним ФОД.

Эффективным решением повышения производительности инструмента являются конструкции с несколькими ФОД (рис. 4, б, в, е, ж). Такие инструменты спроектированы для заданного шага обрабатываемой резьбы, но ее диаметр и направление по-прежнему допускают варьирование. Как и у однодисковых планетарных раскатчиков, конструкцию ФОД можно выполнить с эллиптической или n -гранной направляющей.

Одновременная работа нескольких ФОД увеличивает не только производительность раскатчика, но и момент резьбообразования. Если мощность или жесткость оборудования недостаточны, следует разделить припуск при раскатке резьбы между несколькими начальными дисками инструмента, выполнив их с переменным увеличивающимся наружным диаметром (см. рис. 4, в). После них в конструкции предусмотрены полноразмерные ФОД, завершающие формирование резьбового профиля.

Конструкции планетарных раскатчиков, приведенные на рис. 2 и 4, а–в, являются неразъемными. Они обеспечивают максимально возможную точность взаимного позиционирования формообразующих поверхностей, минимизируют сложность процесса контроля инструмента при изготовлении и передачи крутящего момента при его эксплуатации.

В то же время сборные инструменты имеют более высокие показатели суммарного ресурса и ремонтпригодности. Поэтому семейство спроектированных планетарных раскатчиков допол-

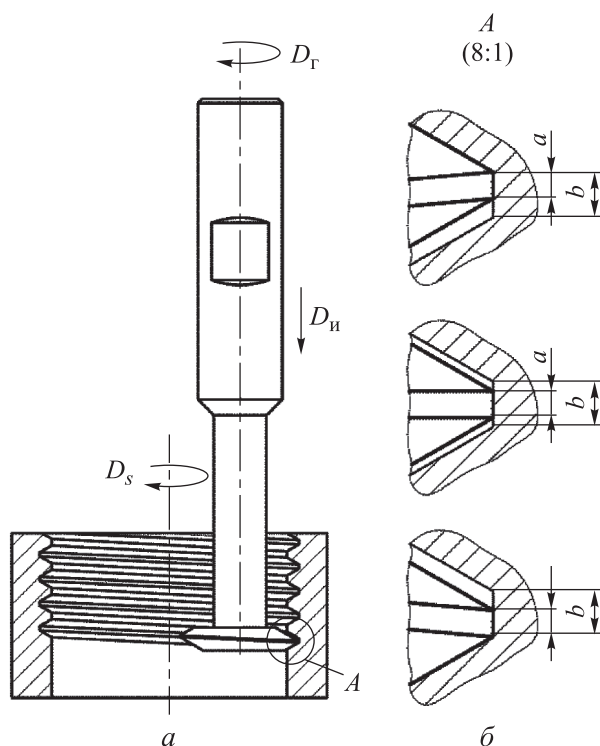


Рис. 3. Схемы формообразования резьбы однодисковым планетарным раскатчиком (а) и этапов создания ее элементов (б)

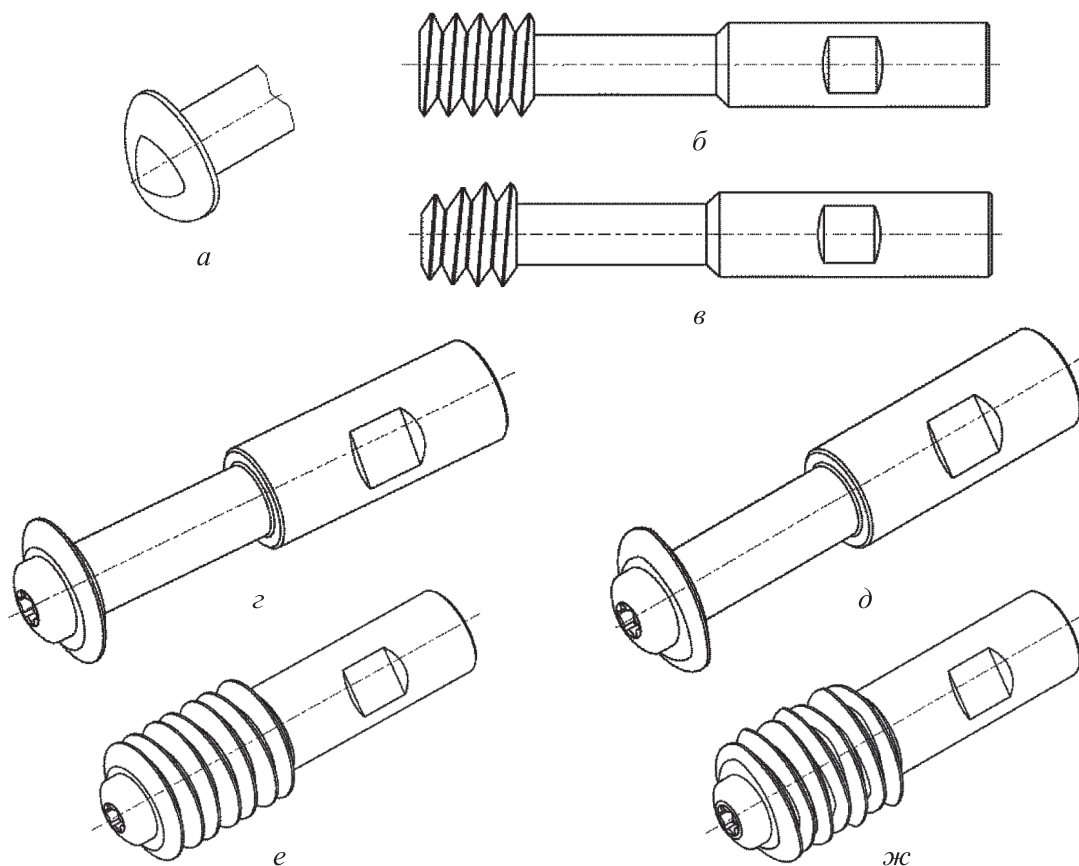


Рис. 4. Схемы неразъемных (а–в) и сборных (г–ж) планетарных раскатников с колеблющимся профилем разного исполнения

нено сборными конструкциями (рис. 4, г–ж), у которых рабочая часть выполнена с учетом всех особенностей накатывания резьб — с одним или несколькими ФОД, с эллиптической или n -гранной направляющей.

Кроме того, формирование рабочей части планетарных раскатников из отдельных дисков позволяет устанавливать ФОД с определенным угловым смещением относительно друг друга δ (см. рис. 4, е, ж). Правильный подбор углового смещения обеспечивает существенное снижение требуемой мощности оборудования вследствие перераспределения силы при обработке.

Поскольку такое конструктивное исполнение инструмента позволяет быстро менять его параметры, его выбрали в качестве базового для экспериментальных исследований работоспособности спроектированных планетарных раскатников с осевым колебанием формообразующего профиля.

Опытный образец, изготовленный для экспериментальных исследований (рис. 5), представлял собой оправку с закрепленными на ней

двумя ФОД диаметром $d = 30$ мм. Поверхность, предназначенная для формирования резьбы, получена по эллиптической направляющей, что обеспечивало колебание профиля в осевом направлении при вращении инструмента.

Для дальнейшей формализации вариантов исполнения планетарного раскатника и протоколирования экспериментальных исследований принято, что угол смещения ФОД $\delta = 0^\circ$, если их ориентации сонаправлены по углу ψ (аналогично неразъемному инструменту, показанному на рис. 4, б). Например, когда крайние верхние положения профилей (см. рис. 3, б) лежат в одной осевой плоскости по одну сторону от оси.

При угле смещения $\delta = 180^\circ$ ФОД разнонаправлены так, что одноименные положения профилей будут лежать в одной осевой плоскости, но по разные стороны от оси. Конструкции, в которых $\delta = 90$ и 270° (или $\delta = -90^\circ$), собраны так, что осевые плоскости с одноименными положениями профилей расположены перпендикулярно друг другу.

При $\delta = 0^\circ$ расстояния между одноименными точками поверхностей ФОД всегда равны



Рис. 5. Опытный образец сборного инструмента с осевым колебанием формообразующих профилей для планетарного накатывания резьбы

шагу резьбы, а при $\delta = 180^\circ$ имеется осевое сечение, в котором с одной стороны это расстояние минимальное, а с другой — максимальное.

Формирование резьбы выполнено четырьмя описанными конструкциями планетарных раскатников с углом смещения ФОД $\delta = 0, 90, 180, 270^\circ$, шагом ФОД, равным шагу резьбы $P = 2$ мм, и шириной вершины диска $a = 0,15$ мм. Угол наклона эллиптической направляющей $\psi = \arctg[(b-a)/d] = 11,5'$, где $b = P/8 = 0,25$ мм.

Формирование нестандартной внутренней резьбы с номинальным диаметром $D_p = 34$ мм и шагом $P = 2$ мм выполнено в пластине толщиной 10 мм из алюминиевого сплава АМг6М (ГОСТ 21631–76) на координатно-расточном станке с ЧПУ 24К40СФ4 при следующих параметрах режима обработки: частота вращения инструмента $n = 1500$ мин⁻¹, подача $S_{\text{мин}} = 150$ мм/мин.

Диаметр подготовленного отверстия $D_{\text{отв}} = 32$ мм. Планетарное раскатывание резьбы проведено в соответствии со схемой, показанной на рис. 3, с того же станка, что и фрезерование предварительного отверстия.

Фотография шлифа осевого сечения резьбы, полученной планетарным раскатником с углом смещения ФОД $\delta = 90^\circ$, приведена на рис. 6, где видно, что перераспределение материала произошло в обе стороны от исходного отверстия. Подачей D_s показано направление движения инструмента при обработке.

На фотографии хорошо просматриваются характерные зоны формообразования резьбы: 1 — ее впадина на свободном торце, деформированная вследствие отсутствия каких-либо ограничений для течения материала; 2 — аналогичная крайняя деформированная вершина резьбового профиля, окончательно сформиро-

ванного после прохода обоих ФОД; 3 — опережающая волна материала, выдавливаемого первым ФОД; 4 — впадина резьбы, полученная колеблющимся профилем ФОД, имеющая небольшой наплыв материала; 5 — профиль резьбы, сформированный пространством между двумя ФОД, являющийся промежуточным профилем перед обработкой вторым диском.

В общем случае при планетарном раскатывании резьбы, как при ее раскатывании метчиками, образуется дефект вершины резьбы, связанный с перераспределением материала и изменяющийся в зависимости от угла смещения ФОД δ .

Высота полученного профиля, равная 1,324 мм, соответствует диапазону требуемой высоты H между $5/8H = 1,082$ мм и теоретически острым профилем 1,732 мм. Максимальная высота выдавливания материала составила 0,406 мм (перед обработкой вторым ФОД высота выдавливания была меньше на 0,266 мм). Полученные диаметральные размеры близки к параметрам резьбы диаметром 34 мм. Однако для более качественного исполнения резьб заданного диаметра необходимы дополнительные исследования соответствия глубины внедрения и высот выдавливания для различных материалов.

Сравнительный анализ силовых параметров формирования резьбы планетарным раскатником с различными вариантами взаимного расположения ФОД проведен с помощью динамометрической установки. Для регистрации ортогональных составляющих силы резбообразования F_x , F_y и F_z использован динамометр Kistler 9257B. Обработка данных выполнена в программах DynoWare и Excel.

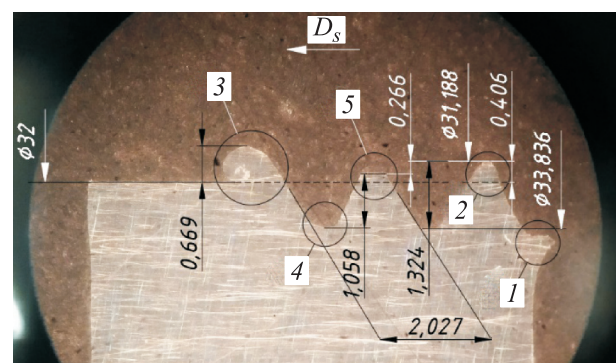


Рис. 6. Фотография шлифа осевого сечения резьбы диаметром $D_p = 34$ мм, полученной планетарным раскатником с углом смещения ФОД $\delta = 90^\circ$

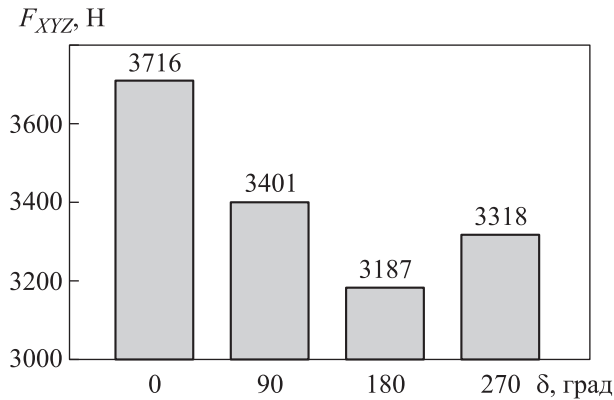


Рис. 7. Зависимость результирующей силы F_{XYZ} от угла смещения ФОД δ при раскатывании резьбы диаметром $D_p = 34$ мм с шагом $P = 2$ мм

Результирующая сила F_{XYZ} в каждый момент раскатывания принята как сумма трех ортогональных векторов и определена по формуле

$$F_{XYZ} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2 + F_Z^2}.$$

Зависимость результирующей силы F_{XYZ} от угла смещения ФОД δ при раскатывании резьбы диаметром $D_p = 34$ мм с шагом $P = 2$ мм приведена на рис. 7. Видно, что наибольшая сила требуется для работы инструментом с одинаково ориентированными ФОД ($\delta = 0^\circ$), а наименьшая — с ФОД, колеблющимися в противофазе ($\delta = 180^\circ$). Уменьшение результирующей силы при резьбообразовании, определяемое как отношение разности значений к большему из них, превысило 14 %.

Дюрометрический анализ поверхностного слоя раскатанной резьбы проводили по методу Виккерса с нагрузкой 25 г на микротвердомере DuraScan-20 на специально подготовленных образцах. Указанные образцы вырезали на станке Struers Discotom-6 по осевой плоскости отверстия, запрессовывали в бакелитовую смолу на прессе для горячей запрессовки образцов CitoPress-1, шлифовали и полировали на шлифовально-полировальном станке Tegamin-25. Микротвердость контролировали по боковым (левой и правой) сторонам выступа резьбы и в зоне, максимально удаленной от области обработки.

Значения микротвердости боковых сторон выступа резьбы после статистической обработки, включавшей в себя проверку наличия грубых ошибок и гипотезы о принадлежности данных выборок и их среднеквадратических отклонений к одной генеральной совокупности с помощью t -критерия Стьюдента и F -критерия Фишера, приведены на рис. 8.

Статистический анализ результатов измерения микротвердости показал, что на обеих сторонах резьбы значения микротвердости принадлежат одной генеральной совокупности, что свидетельствует об одинаковых условиях их формирования.

При измерении микротвердости боковых сторон резьбы дополнительно проводили сравнение резьб, полученных раскатником с двумя ФОД прямого профиля (без осевого колебания) и однодисковой сборной резьбовой фрезой

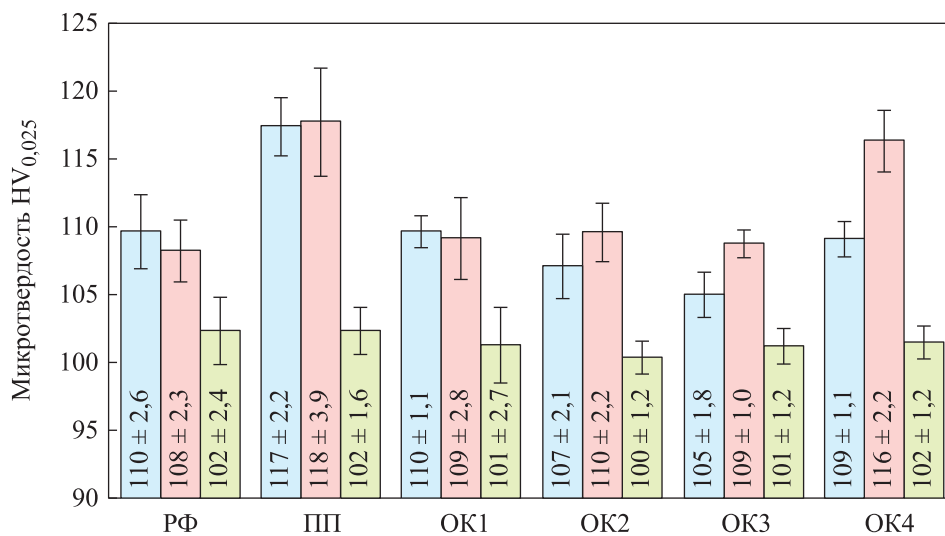


Рис. 8. Распределение микротвердости по поверхности основного материала (■), левой (■) и правой (■) сторон выступа резьбы, полученной разными инструментами:

РФ — резьбовой фрезой 327-16B32EC-09; ПП — раскатником с ФОД прямого профиля (без осевого колебания); ОК1, ОК2, ОК3 и ОК4 — раскатником с осевым колебанием ФОД при угле смещения $\delta = 0, 90, 180$ и 270° соответственно

327-16B32EC-09 со сменной твердосплавной пластиной 327R09-18 250VM-TH (Sandvik Coromant) диаметром 17,7 мм, позволяющей изготавливать резьбу с шагом 2,0...3,5 мм.

Как видно из рис. 8, поверхностный слой резьбы во всех случаях ее обработки имеет большую микротвердость, чем основной материал, что объясняется воздействием инструмента. Степень повышения микротвердости можно оценить как небольшую. Максимальное изменение микротвердости составило 14, а среднее 8,3 %.

Причем обработка раскатником с осевым колебанием ФОД дала результаты, сопоставимые с резанием, что свидетельствует о схожести степени воздействия на материал. В то время как микротвердость инструмента с ФОД прямого профиля (без осевого колебания) больше (до 10 %), чем у резьбовой фрезы и инструмента с осевым колебанием ФОД ($\delta = 180^\circ$).

Выводы

1. Предложен способ планетарного раскатывания резьбы инструментом с осевым коле-

банием резьбообразующих поверхностей, который показал возможность получения резьбы в алюминиевом сплаве АМг6М с профилем, соответствующим профилю метрической резьбы.

2. Показана зависимость результирующей силы при резьбообразовании от угла смещения ФОД сборного инструмента. Ее максимальное снижение (14 %) обеспечил инструмент с углом смещения ФОД $\delta = 180^\circ$ благодаря колебанию дисков в противофазе.

3. Планетарное раскатывание резьбы позволяет увеличить микротвердость ее боковых сторон до 14 %.

4. Планетарное раскатывание инструментом с колебанием формообразующей поверхности вдоль оси резьбы существенно расширяет возможности ее обработки пластическим деформированием за счет универсальности, снижения номенклатуры используемого инструмента и легкости его извлечения при поломке.

5. Проведенные исследования показали работоспособность предложенной конструкции сборного раскатника.

Литература

- [1] Косарев В.А., Иванов В.Ф. Разработка инструмента с пластинами из сверхтвердого нанокompозита для планетарного формообразования внутренней резьбы пластическим деформированием. *Вестник машиностроения*, 2013, № 10, с. 75–77.
- [2] Якухин В.Г., Ставров В.А. *Изготовление резьбы*. Москва, Машиностроение, 1989. 192 с.
- [3] Попов В.О., Смирнов С.Н. Лазерное упрочнение резьбы. *Ритм машиностроения*, 2015, № 1, с. 32–35.
- [4] Песин М.В. Технологическое обеспечение повышения надежности изделий нефтегазодобывающей и горной промышленности. *Экспозиция Нефть Газ*, 2012, № 4, с. 54–55.
- [5] Червач Ю.Б. Упрочнение веревочной резьбы буровых штанг алмазным выглаживанием. *Современные проблемы машиностроения. Тр. VI Межд. науч.-тех. конф.* Томск, Изд-во ТПУ, 2011, с. 306–311.
- [6] Микушев Н.Н., Касьянов С.А., Сазанов В.П. Исследование остаточных напряжений во впадинах резьбы после упрочнения боковых поверхностей выступов с использованием образцов-свидетелей. *XIII Королевские чтения. Тр. межд. молодеж. науч. конф.* Т. 1. Самара, СГАУ, 2015, с. 395–396.
- [7] Кочура Н.Н. Стойкость роликов при многопроходном накатывании крупнопрофильных резьб. *Омский научный вестник*, 2011, № 3, с. 87–90.
- [8] Халтурин О.А., Акилова А.В. Выбор параметров процесса обкатывания конической замковой резьбы. *Master's Journal*, 2013, № 1, с. 15–20.
- [9] Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Тарасов Д.Е. Устройства для реализации упрочнения волной деформации сложнопрофильных поверхностей. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2013, № 3–2, с. 120–128.
- [10] Сидякин Ю.И., Маклецов В.Л. Отделочно-упрочняющая механическая обработка крупных трапецидальных резьб. *Известия ВолгГТУ*, 2014, № 8, с. 35–37.
- [11] Песин М.В., Туранский Р.А., Григорьева А.В. К анализу методов упрочнения резьбы деталей машиностроения. *Актуальные проблемы современного машиностроения. Тр. межд. науч.-практ. конф.* Юрга, 2014, с. 268–270.

- [12] Cheng M., Zhang D., Chen H. Development of ultrasonic thread root rolling technology for prolonging the fatigue performance of high strength thread. *J. Mater. Process. Technol.*, 2014, vol. 214, no. 11, pp. 2395–2401, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.019>
- [13] Егоров Н.И., Полянчиков Ю.Н., Солодков В.А. и др. Охватывающий инструмент с роликами для статико-импульсного упрочнения радиуса впадины резьбы. *Известия ВолгГТУ*, 2015, № 11(173), с. 12–14.
- [14] Сазанов В.П. Исследование влияния предварительной обкатки поверхности роликом на сопротивление усталости резьбовых образцов. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2015, т. 14, № 4, с. 143–150, doi: <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-4-143-150>
- [15] Песин М.В. Исследование остаточных напряжений при упрочнении резьбы бурильных труб. *Экспозиция Нефть Газ*, 2018, № 4, с. 67–69.
- [16] Pesin M.V. Simulation of the technological process of the strengthened treatment of the drill pipes thread. *Appl. Mech. Mater.*, 2015, vol. 770, pp. 476–482, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.770.476>
- [17] Pesin M.V. Improving the reliability of threaded pipe joints. *Russ. Engin. Res.*, 2012, vol. 32, no. 2, pp. 210–212, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X12020232>
- [18] Федорова Л.В., Федоров С.К., Нагнибедова Е.В. и др. Повышение эксплуатационных свойств резьбовых соединений электромеханической обработкой. *Вестник ФГОУ ВПО МГАУ*, 2010, № 2, с. 109–112.
- [19] Федорова Л.В. *Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств резьбовых соединений сельскохозяйственной техники отделочно-упрочняющей электромеханической обработкой*. Автореф. дисс. ... док. тех. наук. Москва, МГАУ им. В.П. Горячкина, 2006. 29 с.
- [20] Волков М.В., Кишалов А.А., Храмов В.Ю. Применение волоконного лазера для закалки резьбовых соединений с целью повышения их износостойкости. *Известия ВУЗов. Приборостроение*, 2014, т. 57, № 6, с. 68–72.
- [21] Tool technology for mechanical metal surface improvement. Solutions that meet high surface quality demands. *ecoroll.de: веб-сайт*. URL: http://www.ecoroll.de/fileadmin/blaetterkataloge/index.html?catalog=2018_01_E (дата обращения: 12.10.2018).
- [22] Одинцов Л.Г. *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 1987. 328 с.
- [23] Мальков О.В., Малькова Л.Д. *Инструмент для планетарного накатывания резьбы с осевым колебанием формообразующей поверхности*. Патент РФ 2612857. Заявл. 17.11.2015, опубл. 13.03.2017.
- [24] Мальков О.В., Малькова Л.Д. *Сборный инструмент для планетарного накатывания резьбы с осевым колебанием формообразующей поверхности*. Патент РФ 2613002. Заявл. 17.11.2015, опубл. 14.03.2017.
- [25] Мальков О.В., Дульнев К.В. Влияние упрочняющего инструмента на резьбовую поверхность. *Всерос. науч.-метод. конф., посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, с. 46–49.

References

- [1] Kosarev V.A., Ivanov V.F. Development of tool with ultra-hard nanocomposite plates for planetary forming of internal thread by plastic deformation. *Vestnik mashinostroeniya*, 2013, no. 10, pp. 75–77. (In Russ.).
- [2] Yakukhin V.G., Stavrov V.A. *Izgotovlenie rez'by* [Fabrication of thread]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 192 p. (In Russ.).
- [3] Popov V.O., Smirnov S.N. Laser hardening of thread. *Ritm mashinostroeniya*, 2015, no. 1, pp. 32–35. (In Russ.).
- [4] Pesin M.V. Technological guarantee of details reliability for oil-and-gas gas extraction and mining industry. *Ekspozitsiya Neft' Gaz* [Exposition Oil Gas], 2012, no. 4, pp. 54–55. (In Russ.).
- [5] Chervach Yu.B. [Hardening of a rope thread of boring bars by diamond dragging]. *Sovremennye problemy mashinostroeniya. Tr. VI Mezhd. nauch.-tekh. konf.* [Modern Issues of

- Machine Building. Proc. VI Int. Sci.-Tech. Conf.]. Tomsk, Izd-vo TPU Publ., 2011, pp. 306–311. (In Russ.).
- [6] Mikushev N.N., Kas'yanov S.A., Sazanov V.P. [Study on residual stress in thread roots after hardening of crest side surfaces using control samples]. *XIII Korolevskie chteniya. Tr. mezhd. molodezh. nauch. konf.* T. 1 [XIII Korolev Readings. Proc. Int. Youth Sci. Conf. Vol. 1]. Samara, SGAU, 2015, pp. 395–396. (In Russ.).
- [7] Kochura N.N. Resistance rollers for multipass rolling of large profile threads. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2011, no. 3, pp. 87–90. (In Russ.).
- [8] Khalturin O.A., Akilova A.V. Selection of process parameters of running tapered joint thread. *Master's Journal*, 2013, no. 1, pp. 15–20. (In Russ.).
- [9] Kirichek A.V., Solov'yev D.L., Tarasov D.E. The device for realization of hardening wave deformation of the complex-profile surfaces. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2013, no. 3–2, pp. 120–128. (In Russ.).
- [10] Sidyakin Yu.I., Makletsov V.L. Finishing hardening mechanical processing of large trapezium thread. *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia VSTU], 2014, no. 8, pp. 35–37. (In Russ.).
- [11] Pesin M.V., Turanskiy R.A., Grigor'yeva A.V. [To analysis of hardening methods for thread of machine parts]. *Aktual'nye problemy sovremennogo mashinostroeniya. Tr. mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Actual Issues of Modern Machine Building. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Yurga, 2014, pp. 268–270. (In Russ.).
- [12] Cheng M., Zhang D., Chen H. Development of ultrasonic thread root rolling technology for prolonging the fatigue performance of high strength thread. *J. Mater. Process. Technol.*, 2014, vol. 214, no. 11, pp. 2395–2401, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.019>
- [13] Egorov N.I., Polyanchikov Yu.N., Solodkov V.A. et al. Covering tool with rollers for static-pulse hardening of thread root radius. *Izvestiya VolgGTU*, 2015, no. 11(173), pp. 12–14. (In Russ.).
- [14] Sazanov V.P. Investigation of preliminary surface rolling influence on the fatigue resistance of threaded specimens. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara University], 2015, vol. 14, no. 4, pp. 143–150, doi: <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-4-143-150> (in Russ.).
- [15] Pesin M.V. Research of residual stresses in hardening of drill pipe thread. *Ekspozitsiya Neft' Gaz* [Exposition Oil Gas], 2018, no. 4, pp. 67–69. (In Russ.).
- [16] Pesin M.V. Simulation of the technological process of the strengthened treatment of the drill pipes thread. *Appl. Mech. Mater.*, 2015, vol. 770, pp. 476–482, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.770.476>
- [17] Pesin M.V. Improving the reliability of threaded pipe joints. *Russ. Engin. Res.*, 2012, vol. 32, no. 2, pp. 210–212, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X12020232>
- [18] Fedorova L.V., Fedorov S.K., Nagnibedova E.V. et al. Raise of operational properties of threaded connections by electromechanical machining. *Vestnik FGOU VPO MGAU* [Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University Named After V.P. Goryachkin"], 2010, no. 2, pp. 109–112. (In Russ.).
- [19] Fedorova L.V. *Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh svoystv rez'bovykh soedineniy sel'skokhozyaystvennoy tekhniki otdelchno-uprochnyayushchey elektromekhanicheskoy obrabotkoy*. Avtoref. diss. dok. tekhn. nauk [Technological support of exploitation properties of farm machinery thread joints by hardening electromechanical processing. Abs. doc. tech. sci. diss.]. Moscow, MGAU im. V.P. Goryachkina Publ., 2006. 29 p. (In Russ.).
- [20] Volkov M.V., Kishalov A.A., Khramov V.Yu. Employment of fiber laser in hardening of threaded coupling to improve its wear properties. *Izvestiya VUZov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2014, vol. 57, no. 6, pp. 68–72. (In Russ.).
- [21] Tool technology for mechanical metal surface improvement. Solutions that meet high surface quality demands. *ecoroll.de: website*. URL: http://www.ecoroll.de/fileadmin/blaetterkataloge/index.html?catalog=2018_01_E (accessed: 12.10.2018).
- [22] Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Parts hardening and finishing by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p. (In Russ.).

- [23] Mal'kov O.V., Mal'kova L.D. *Instrument dlya planetarnogo nakatyvaniya rez'by s oseвым kolebaniem formoobrazuyushchey poverkhnosti* [Tool for planetary thread rolling with axial oscillation of moulding surface]. Patent RU 2612857. Appl. 17.11.2015, publ. 13.03.2017. (In Russ.).
- [24] Mal'kov O.V., Mal'kova L.D. *Sbornyy instrument dlya planetarnogo nakatyvaniya rez'by s oseвым kolebaniem formoobrazuyushchey poverkhnosti* [Modular tool for planetary thread rolling with axial vibration of moulding surface]. Patent RU 2613002. Appl. 17.11.2015, publ. 14.03.2017. (In Russ.).
- [25] Mal'kov O.V., Dul'nev K.V. [Effect of hardening tool on thread surface]. *Vseros. nauch.-metod. konf., posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya N.P. Malevskogo* [Russ. Sci.-Method. Conf. in Mark of 100-Anniversary of N.P. Malevskiy]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020, pp. 46–49. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 14.04.2022

Информация об авторах

МАЛЬКОВ Олег Вячеславович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: malkov@bmstu.ru).

МАЛЬКОВА Людмила Дмитриевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: ldm@bmstu.ru).

ВОЛОТОВ Дмитрий Игоревич — техник первой категории лаборатории кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: volotovdi@student.bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мальков О.В., Малькова Л.Д., Волотов Д.И. Обработка резьбы инструментом с осевым колебанием резьбообразующих профилей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 11, с. 25–37, doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-25-37

Please cite this article in English as:

Malkov O.V., Malkova L.D., Volotov D.I. Thread Processing with a Tool with Axial Oscillation of Thread Forming Profiles. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 11, pp. 25–37, doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-25-37

Information about the authors

MALKOV Oleg Vyacheslavovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Tools and Tooling Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: malkov@bmstu.ru).

MALKOVA Lyudmila Dmitrievna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Tools and Tooling Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ldm@bmstu.ru).

VOLOTOV Dmitry Igorevich — Technician of the first category of the laboratory Department of Tools and Tooling Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: volotovdi@student.bmstu.ru).