УДК 621:787

*В. К. Шелег, А. М. Довгалев, И. А. Тарадейко*

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОГО МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

UDC 621:787

*V. K. Sheleg, A. M. Dovgalev, I. A. Taradeiko*

# INFLUENCE OF PARAMETERS OF COMBINED MAGNETODYNAMIC ROLLING ON SURFACE ROUGHNESS

**Аннотация**

Приведены результаты исследований зависимости шероховатости обработанной поверхности от основных технологических и конструктивных параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания, необходимые технологам и инженерным работникам при назначении рациональных режимов упрочняющей обработки.

**Ключевые слова**:

магнитное поле, деформирующие шары, отделочно-упрочняющая обработка, накатывание, шероховатость поверхности, наноструктурированный поверхностный слой, эксплуатационные свойства.

**Abstract**

The paper presents the results of investigating the relationship between the roughness of the surface treated and the main technological and design parameters of the process of combined magnetodynamic rolling, which technologists and engineers need to select rational modes of strengthening treatment.

**Keywords**:

magnetic field, deforming balls, finishing and strengthening treatment, rolling, surface roughness, nanostructured surface layer, performance properties.

## *Введение*

Для машиностроения важной технологической задачей является разработка и применение инновационных методов отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающих повышение эффективности процесса упрочнения поверхностей ответственных деталей машин, характеристик упрочнения их поверхностного слоя и эксплуатационных свойств [1, 2].

Большой научный и практический интерес представляет разработанный в Белорусско-Российском университете метод совмещенного магнитно-динамического накатывания (СМДН) внутренних цилиндрических поверхностей нежестких ферромагнитных деталей, в соответствии с которым на поверхностный слой одновременно воздействуют вращающимся постоянным или переменным магнитным полем с индукцией 0,05…1,20 Тл и колеблющимися деформирующими шарами, свободно расположенными в кольцевой камере, получающими энергию для многократного импульсно-ударного деформирования от периодически действующего магнитного поля комбинированного инструмента. Указанный метод позволяет получать на деталях пар трения

© Шелег В. К., Довгалев А. М., Тарадейко И. А., 2021

поверхностные структуры с новыми физико-механическими свойствами [3, 4]. Метод СМДН обеспечивает интенсивное снижение исходной шероховатости поверхности по параметру Ra с 6,3…0,40 до 0,6…0,05 мкм, повышение точности геометрической формы поперечного сечения нежестких деталей, получение на поверхности ферромагнитной детали модифицированного антифрикционного слоя глубиной 10…25 мкм и наноструктурированного поверхностного слоя толщиной 1,5…3,0 мкм, повышение износостойкости поверхностей ферромагнитных деталей более чем в 3 раза [5–10].

Однако имеющиеся в настоящее время в литературных источниках сведения о совмещенном магнитно-динамическом накатывании указывают на необходимость проведения дальнейших исследований по определению технологических возможностей разработанного метода.

*Постановка задачи.* В связи с технической новизной метода СМДН и отсутствием исследований его технологических возможностей важно оценить влияние параметров процесса совмещенного упрочнения на шероховатость обработанной поверхности, являющейся комплексной характеристикой качества поверхностного слоя и во многом определяющей его эксплуатационные свойства. Полученные результаты исследований шероховатости поверхности ферромагнитных деталей при обработке СМДН позволят технологам назначать рациональные режимы и будут способствовать внедрению процесса совмещенного упрочнения в производство.

## *Основная часть*

Шероховатость упрочненных поверхностей заготовок по параметру Ra измеряли на профилометре-профилографе Surftest SJ-210 фирмы Mitutoyo (Япония). Погрешность измерения не превышала 5 %. Для исключения систематической составляющей погрешности измерения производили регулирование профилометра-профилографа с помощью образцов шероховатости. Измерение шероховатости поверхности заготовок выполняли при одной настройке прибора и температуре окружающей среды 20…22 °С. За величину шероховатости упрочненной поверхности заготовки принимали среднее значение пяти измерений. На каждом из исследуемых режимов СМДН обрабатывали пять заготовок.

Упрочнение внутренней поверхности ферромагнитных заготовок осуществляли на фрезерном станке с ЧПУ мод. FSS-400. В качестве инструмента использовали специальный комбинированный раскатник.

*Характеристики обрабатываемых заготовок.* В качестве обрабатываемых заготовок использовали кольца из стали 45, 40Х и серого чугуна СЧ 20 с размерами (D × d × ℓ) – 125 × 110 × 12 мм.

*Параметры комбинированного инструмента*:

– диаметр деформирующих шаров – 12 мм;

– материал деформирующих шаров – ШХ15 (62…65 HRC);

– материал цилиндрических постоянных магнитов Nd Fe B;

– размер цилиндрических постоянных магнитов (D × h) – 15 × 5 мм;

– количество магнитов, осуществляющих воздействие на деформирующие шары, – 22 шт.;

– количество цилиндрических постоянных магнитов, осуществляющих намагничивание поверхностного слоя упрочняемых нежестких колец, – 32 шт.;

– материл магнитопроводов – сталь Ст 3.

Отверстия стальных и чугунных заготовок различной твердости предварительно обрабатывали в размер Ø110H8 следующими технологическими методами с обеспечением соответствующей шероховатости по параметру Ra:

– *растачиванием* (Ra 5,8…6,0 и 3,0…3,2 мкм) – сталь 45 (190…200 HB), сталь 40Х (180…190 HB), сталь 45 (30…35 HRC), серый чугун СЧ 20 (150…160 HB);

– *растачиванием* (Ra 2,0…2,2 мкм) – сталь 45 (190…200 HB), серый чугун СЧ 20 (150…160 HB);

– *растачиванием* (Ra 1,0…1,2 мкм) – сталь 45 (20…25 HRC), сталь 40Х (25…28 HRC);

– *шлифованием* (Ra 0,63…0,60 мкм) – сталь 45 (30…35 HB), сталь 40Х (28…30 HRC);

– *хонингованием* (Ra 0,40…0,35 мкм) – сталь 45 (30…35 HRC), серый чугун СЧ 20 (25…30 HRC).

Режимы процесса СМДН:

– частота вращения инструмента – 1600…4500 мин$^{-1}$ (окружная скорость инструмента – 552,6…1554,3 м/мин);

– осевая подача инструмента – 20…160 мм/мин;

– индукция вращающегося магнитного поля, действующего на упрочняющую поверхность заготовки, – 0,130 Тл;

– индукция магнитной системы инструмента – 0,350 Тл;

– количество рабочих ходов инструмента – один;

– охлаждение – масло индустриальное 45.

### *Исследование шероховатости поверхности от частоты вращения комбинированного инструмента*

Результаты экспериментальных исследований зависимости шероховатости упрочненных заготовок от частоты вращения комбинированного инструмента при СМДН внутренних цилиндрических поверхностей ферромагнитных заготовок из различных материалов, полученных растачиванием и имеющих соответствующую исходную шероховатость, представлены на рис. 1–3.

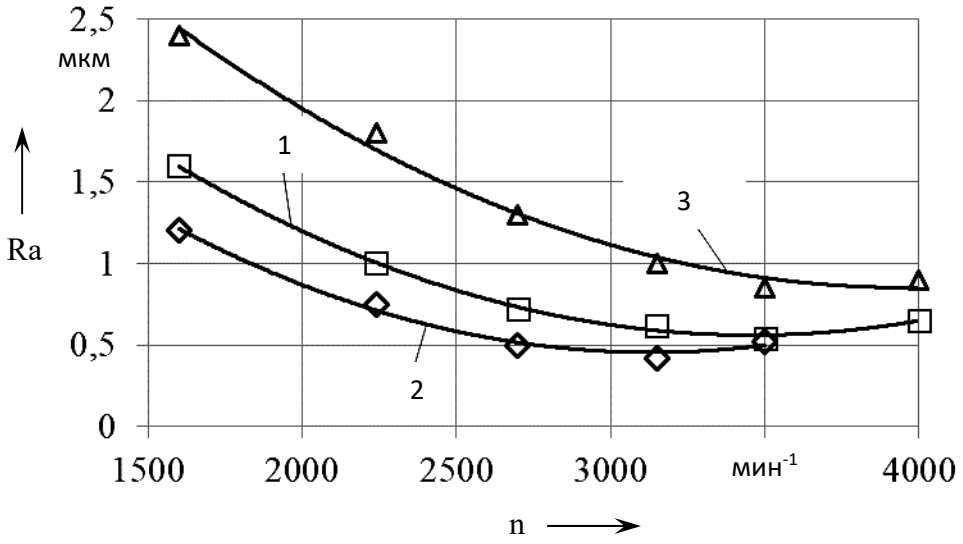


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$ 5,8…6,0 мкм (S = 20 мм/мин; d = 12 мм; $B_{дет}$ = 0,130 Тл): 1 – сталь 45 (190…200 HB); 2 – сталь 40Х (180…190 HB); 3 – сталь 45 (30…35 HRC)

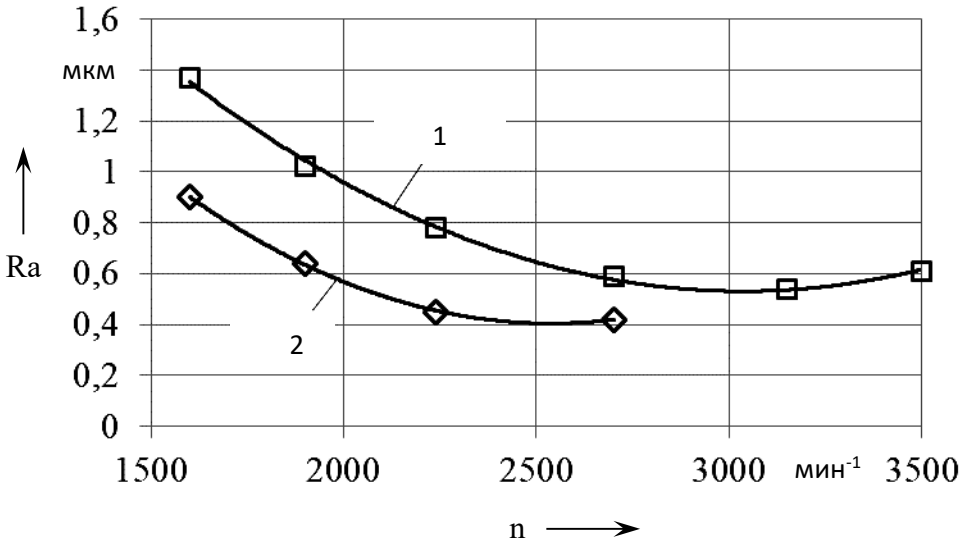


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$ 2,0…2,2 мкм (S = 20 мм/мин; d = 12 мм; $B_{дет}$ = 0,130 Тл): 1 – сталь 45 (190…200 HB); 2 – серый чугун СЧ 20 (150…160 HB)

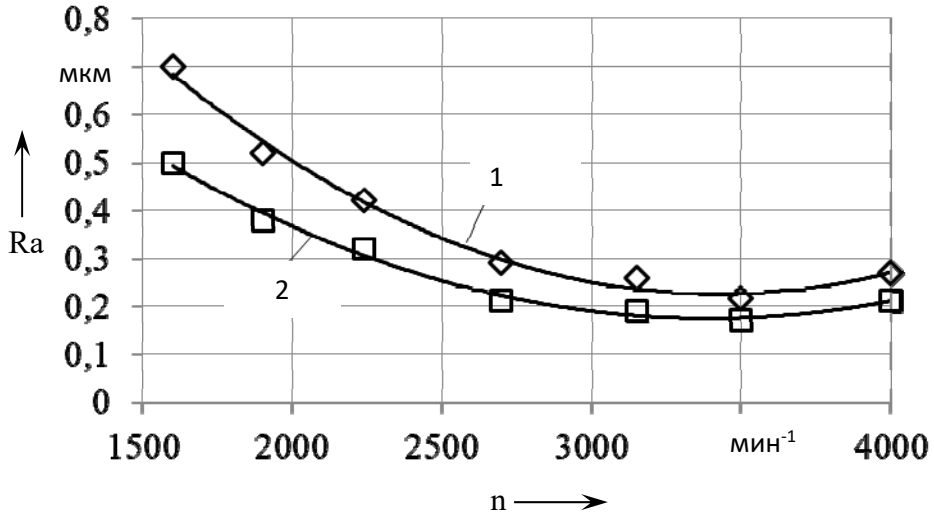


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$ 1,0…1,2 мкм (S = 20 мм/мин; d = 12 мм; $B_{дет}$ = 0,130 Тл): 1 – сталь 45 (20…25 HRC); 2 – сталь 40Х (25…28 HRC)

На рис. 4 показаны зависимости шероховатости поверхности заготовок от частоты вращения инструмента при СМДН внутренних цилиндрических поверхностей заготовок, предварительно обработанных шлифованием с достижением шероховатости по параметру Ra 0,60…0,63 мкм.

На рис. 5 изображены зависимости шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$ 0,35…0,40 мкм, полученной хонингованием.

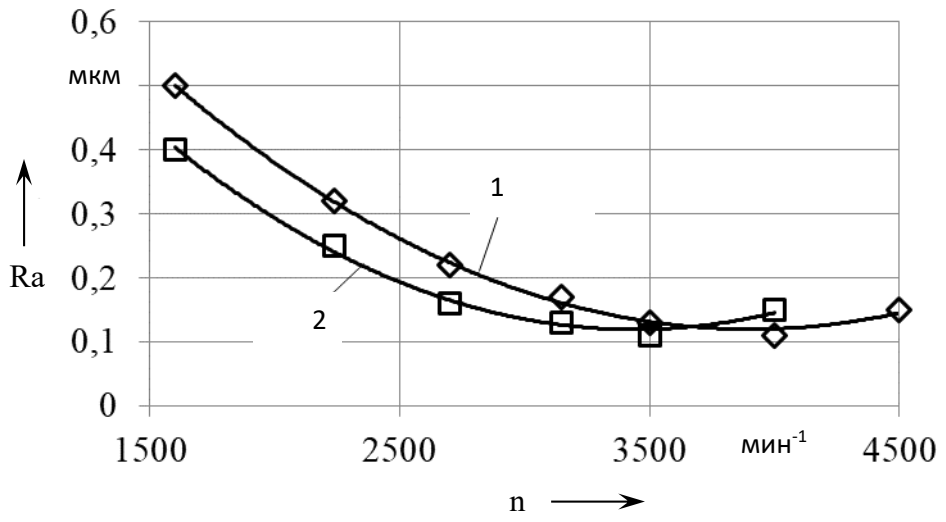


Рис. 4. Зависимости шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$ 0,60…0,63 мкм (S = 20 мм/мин; d = 12 мм; $B_{дет}$ = 0,130 Тл): 1 – сталь 45 (30…35 HRC); 2 – сталь 40Х (28…30 HRC)

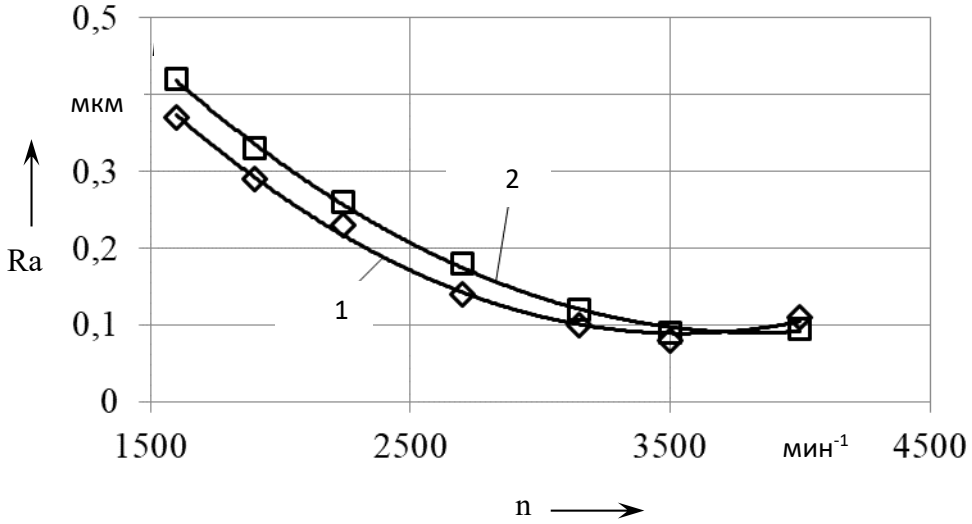


Рис. 5. Зависимости шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$ 0,35…0,40 мкм (S = 20 мм/мин; d = 12 мм; $B_{дет}$ = 0,130 Тл): 1 – сталь 45 (30…35 HRC); 2 – серый чугун СЧ 20 (25…30 HRC)

Анализ результатов исследований показывает, что шероховатость упрочненной поверхности ферромагнитных заготовок существенно зависит от частоты вращения инструмента, определяющей характеристики импульсно-ударного воздействия деформирующих шаров.

Как видно из рис. 1–5, при частоте вращения инструмента менее 1600 мин$^{-1}$ деформирующие шары находятся на поверхности магнитной системы (т. к. действующей центробежной силы недостаточно для преодоления силы их магнитного притяжения к источникам магнитного поля) и не взаимодействуют с упрочняемой заготовкой. При увеличении частоты вращения комбинированного инструмента более 1600 мин$^{-1}$ деформирующие шары отрываются от

поверхности магнитной системы. Под действием магнитного поля деформирующие шары инструмента перемещаются в окружном направлении кольцевой камеры, совершают радиальные колебательные движения и выполняют импульсно-ударное деформирование поверхности заготовки.

По мере увеличения частоты вращения инструмента возрастает и сила импульсно-ударного воздействия деформирующих шаров на упрочняемую поверхность ферромагнитной заготовки. В процессе совмещенной отделочно-упрочняющей обработки происходит пластическое перераспределение деформированного металла из вершин во впадины микронеровностей.

Одновременно с увеличением силы динамического воздействия на упрочняемую поверхность со стороны деформирующих шаров возрастает и сопротивление деформации металла, что несколько замедляет процесс уменьшения высоты исходных микронеровностей заготовки. Когда впадины микронеровностей полностью заполнятся деформированным металлом, высота шероховатости обрабатываемой поверхности заготовки стабилизируется.

Если частота вращения комбинированного инструмента превышает оптимальное значение, то происходит некоторое увеличение шероховатости поверхности заготовки. Это может быть обусловлено снижением динамической активности деформирующих шаров (вследствие рассогласования частоты воздействия вращающегося магнитного поля с частотой собственных колебаний деформирующих шаров) или переупрочнением поверхностного слоя заготовки.

Из представленных на рис. 1–5 зависимостей следует, что рациональными значениями частот вращения комбинированного инструмента, при которых обеспечивается максимальная деформация (максимальное снижение) исходных микронеровностей поверхности заготовок, являются:

– $Ra_{исх}$ 5,8…6,0 мкм:

а) сталь 45 (190…200 HB) – n = 3550 мин$^{-1}$;

б) сталь 40Х (180…220 HB) – n = 3150 мин$^{-1}$;

в) сталь 45 (30…35 HRC) – n = 4000 мин$^{-1}$;

– $Ra_{исх}$ 2,0…2,2 мкм:

а) сталь 45 (190…200 HB) – n = 3080 мин$^{-1}$;

б) серый чугун СЧ 20 (150…160 HB) – n = 2500 мин$^{-1}$;

– $Ra_{исх}$ 1,0…1,2 мкм:

а) сталь 45 (20…25 HRC) – n = 3550 мин$^{-1}$;

б) сталь 40Х (25…28 HRC) – n = 3350 мин$^{-1}$;

– $Ra_{исх}$ 0,60…0,63 мкм:

а) сталь 45 (30…35 HRC) – n = 3850 мин$^{-1}$;

б) сталь 40Х (28…30 HRC) – n = 3320 мин$^{-1}$;

– $Ra_{исх}$ 0,35…0,40 мкм:

а) сталь 45 (30…35 HRC) – n = 3700 мин$^{-1}$;

б) серый чугун СЧ 20 (25…30 HRC) – n = 3580 мин$^{-1}$.

Анализ результатов исследования шероховатости поверхности показал, что метод СМДН имеет хорошие технологические возможности, обеспечивает снижение исходной шероховатости поверхности стальных и чугунных заготовок твердостью 190…220 HB в 4–9 раз, а с твердостью 28…30 HRC – в 4–6 раз.

### *Исследование шероховатости поверхности от подачи комбинированного инструмента*

Одним из важных режимов процесса СМДН является подача комбинированного инструмента (далее – инструмента) относительно обрабатываемой поверхности, определяющая интенсивность импульсно-ударного воздействия деформирующих шаров на элементарную поверхность ферромагнит-

ной заготовки в единицу времени. Подача инструмента определяет характеристики формируемого на обрабатываемой поверхности заготовки микрорельефа, получаемого вследствие сопряжения микролунок от деформирующих шаров комбинированного инструмента.

На рис. 6–8 показаны экспериментальные зависимости шероховатости поверхности от подачи инструмента при СМДН внутренней цилиндрической поверхности колец, имеющих исходную шероховатость Ra 5,8…6,2; 2,0…2,2 и 1,0…1,2 мкм соответственно.

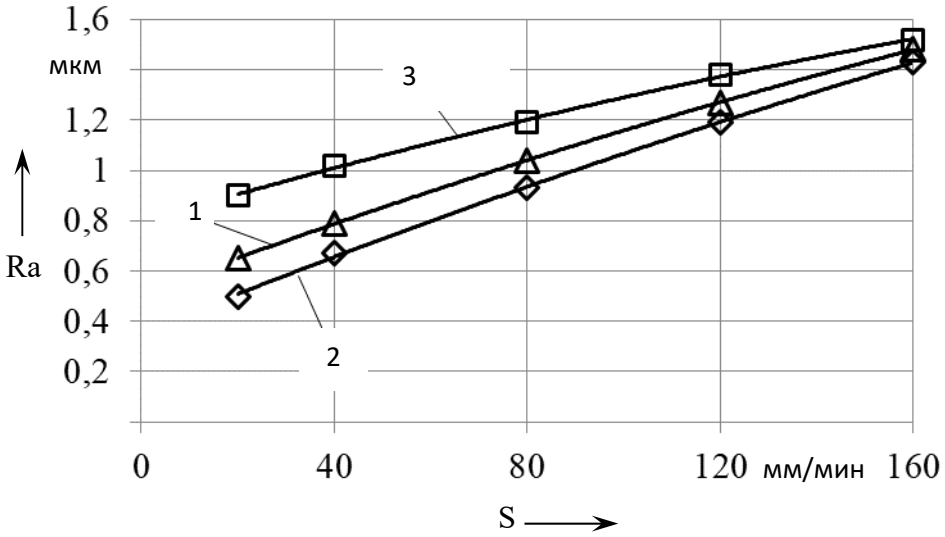


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности от подачи инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$ 5,8…6,2 мкм (d = 12 мм; $B_{дет}$ = 0,130 Тл; n = 3500 мин$^{-1}$): 1 – сталь 45 (190…200 НВ); 2 – сталь 40Х (180…190 НВ); 3 – серый чугун СЧ 20 (150…160 НВ)

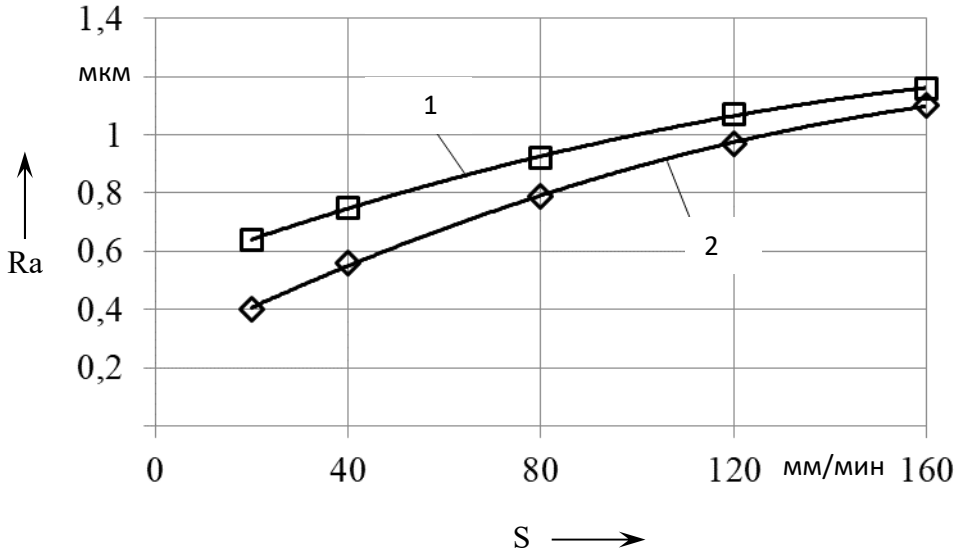


Рис. 7. Зависимость шероховатости поверхности от подачи инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$ 2,0…2,2 мкм (d = 12 мм; $B_{дет}$ = 0,130 Тл; n = 2500 мин$^{-1}$): 1 – сталь 45 (190…200 НВ); 2 – серый чугун СЧ 20 (150…160 НВ)

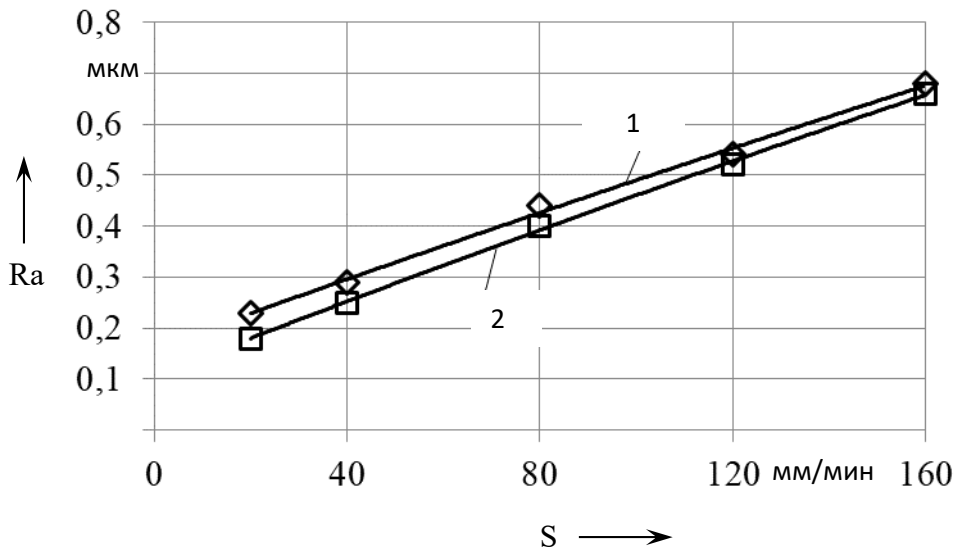


Рис. 8. Зависимость шероховатости поверхности от подачи инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$ 1,0…1,2 мкм (d = 12 мм; $B_{дет}$ = 0,130 Тл; n = 3500 мин$^{-1}$): 1 – сталь 45 (20…25 HRC); 2 – сталь 40Х (25…28 HRC)

На рис. 9 изображены зависимости шероховатости внутренней поверхности колец от подачи инструмента при СМДН заготовок из стали 45 (30…35 HRC), стали 40Х (28…30 HRC), обработанных шлифованием и имеющих исходную шероховатость $Ra_{исх}$ 0,60…0,63 мкм.

На рис. 10 изображены зависимости шероховатости поверхности от подачи инструмента при упрочнении внутренней поверхности колец СМДН, полученной хонингованием с исходной шероховатостью $Ra_{исх}$ 0,35…0,40 мкм.

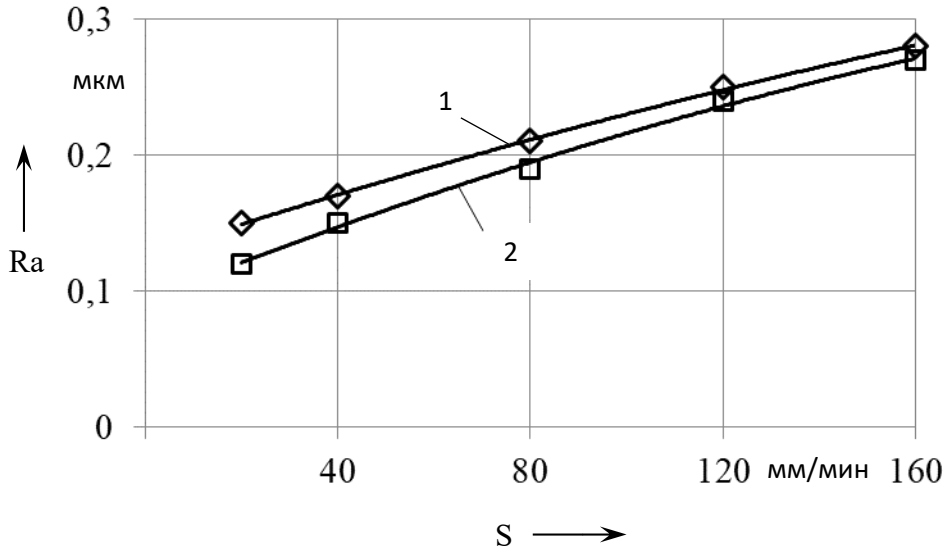


Рис. 9. Зависимости шероховатости поверхности от подачи инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$ 0,60…0,63 мкм (d = 12 мм; $B_{дет}$ = 0,130 Тл; n = 4000 мин$^{-1}$): 1 – сталь 45 (30…35 HRC); 2 – сталь 40Х (28…30 HRC)

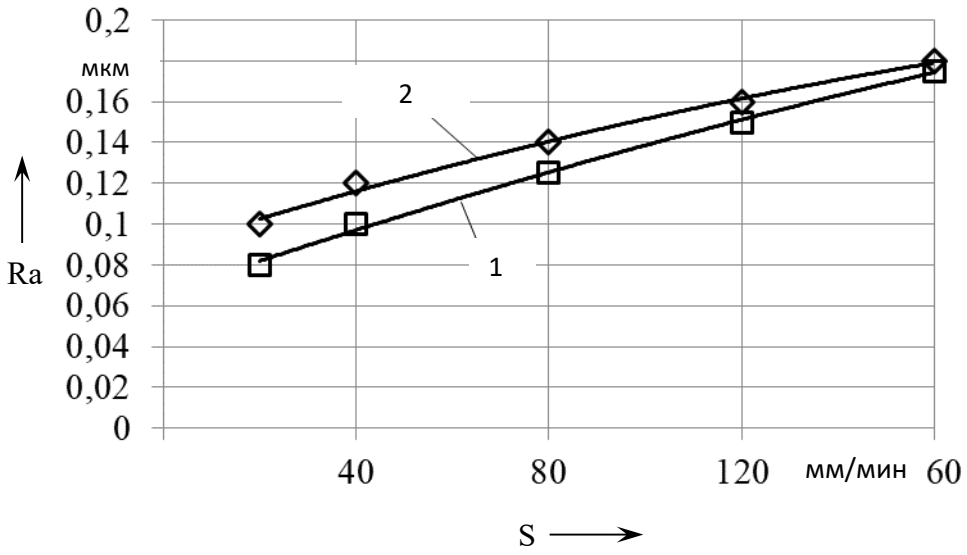


Рис. 10. Зависимости шероховатости поверхности от подачи инструмента при исходной шероховатости поверхности заготовок $Ra_{исх}$ 0,35…0,40 мкм (d = 12 мм; $B_{дет}$ = 0,130 Тл; n = 3600 мин$^{-1}$): 1 – сталь 45 (30…35 HRC); 2 – серый чугун СЧ 20 (25…30 HRC)

Из рис. 6–10 следует, что величина подачи инструмента при СМДН может выбираться в широких пределах в соответствии с требуемой шероховатостью поверхности детали, заданной чертежом.

### *Заключение*

Определены оптимальные значения частот вращения комбинированного инструмента, обеспечивающие минимальную шероховатость поверхности для заготовок из исследуемых материалов, имеющих различную исходную шероховатость.

Установлено, что метод СМДН обеспечивает снижение исходной шероховатости поверхности заготовок: сталь 45 (190…220 HB) – в 9,6 раза (с Ra 5,75 до 0,60 мкм); сталь 45 (30…35 HRC) – в 3,6 раза (с Ra 2,00 до 0,55 мкм); серый чугун СЧ 20 (150…160 HB) – в 5,0 раз (с Ra 2,00 до 0,4 мкм).

Выявлено, что на шероховатость формируемой поверхности при СМДН влияет величина подачи комбинированного инструмента. При упрочнении поверхности заготовок в диапазоне подач инструмента от 20 до 160 мм/мин обеспечивается снижение шероховатости поверхности: из стали 45 (190…220 HB) с исходной шероховатостью $Ra_{исх}$ 5,8…6,2 мкм – до Ra 1,42…0,60 мкм; из серого чугуна СЧ 20 (150…160 HB) с $Ra_{исх}$ 2,0…2,2 мкм – до Ra 1,1…0,4 мкм; из стали 45 (20…25 HRC) с $Ra_{исх}$ 1,0…1,2 мкм – до Ra 0,68…0,23 мкм; из стали 45 (30…35 HRC) с $Ra_{исх}$ 0,60…0,63 мкм – до Ra 0,27…0,20 мкм; из стали 45 (30…35 HRC) с $Ra_{исх}$ 0,35…0,40 мкм – до Ra 0,17…0,08 мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология и инструменты для отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник в 2 т. / Под общ. ред. А. Г. Суслова. – Москва: Машиностроение, 2014. – Т. 1. – 480 с.

2. Технология и инструменты для отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник в 2 т. / Под общ. ред. А. Г. Суслова. – Москва: Машиностроение, 2014. – Т. 2. – 444 с.

3. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. РФ 2068770 / А. М. Довгалев. – Опубл. 10.11.1996.

4. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. РФ 2089373 / А. М. Довгалев. – Опубл. 10.09.1997.

5. **Довгалев, А. М.** Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалев. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.

6. Математическое моделирование процесса совмещенной обработки деталей магнитно-динамическим раскатыванием и вращающимся магнитным полем / В. К. Шелег [и др.] // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 152–160.

7. **Dovgalev, A.** Combined magnetic dynamic rolling as process module for quality assurance / A. Dovgalev // Technologia i automatyzacja montazu. – 2015. – № 3. – С. 54–60.

8. **Довгалев, А. М.** Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А. М. Довгалев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18–35.

9. **Довгалев, А. М.** Разработка магнитных систем комбинированных инструментов для совмещенного магнитно-динамического накатывания / А. М. Довгалев // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 1. – С. 15–26.

10. **Шелег, В. К.** Исследование триботехнических свойств поверхностей деталей, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В. К. Шелег, А. М. Довгалев // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 330–334.

*Статья сдана в редакцию 3 февраля 2021 года*

**Валерий Константинович Шелег,** д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет. E-mail: sheleh_v@tut.by.

**Александр Михайлович Довгалев,** канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-29-345-40-56. E-mail: rct@bru.by.

**Иван Анатольевич Тарадейко,** ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-33-659-38-68. E-mail:: IvanTaradeiko@yandex.ru.

**Valery Konstantinovich Sheleg,** DSc (Engineering), Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian National Technical University. E-mail: ShelehV@tut.by.

**Aleksandr Mikhailovich Dovgalev,** PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: +375-29-345-40-56. E-mail: rct@bru.by.

**Ivan Anatolyevich Taradeiko,** assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-33-659-38-68. E-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.