

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВИБРОТОЧЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ

*Кудинов Е.А., Владимиров А.А., Макаров А.А., Шаповалов А.И.*

*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического института «МИСИС», Старый Оскол*

**Ключевые слова:** микрогеометрия, опережающая трещина, шероховатость поверхности, амплитудно-частотные параметры, опорная площадь, специальные канавки, жидкостное трение, масляный клин.

**Аннотация.** В данной работе рассмотрен процесс вибрационного точения образцов из нержавеющей стали. Приведены результаты сравнения представленного метода обработки с аналогами, выделены преимущества и недостатки описываемого метода обработки. Представлены теоретические зависимости распределения деформаций и напряжений при вибрационном точении. Представлены фотографии полученных после обработки поверхностей, графики средней линии шероховатости и опорной длины профиля. На основании результатов практических экспериментов смоделированы различные варианты микрогеометрий и построены графики зависимостей от амплитудно-частотных параметров процесса обработки. Приведены рекомендации по назначению амплитудно-частотных параметров вибрационного точения для различных случаев применения таких микрогеометрий поверхности.

## PROSPECTS FOR THE USE OF VIBROTURNING FOR THE FORMATION OF A SURFACE MICROPROFILE

*Kudinov E.A., Vladimirov A.A., Makarov A.V., Shapovalov A.I.*

*Stary Oskol Institute of Technology A.A. Ugarova (branch) of the National Research Technological Institute "MISIS", Stary Oskol*

**Keywords:** microgeometry, leading crack, surface roughness, amplitude-frequency parameters, bearing area, special grooves, fluid friction, oil wedge.

**Abstract.** In this paper, the process of vibratory turning of stainless steel specimens is considered. The results of comparison of the presented processing method with analogues are given, the advantages and disadvantages of the described processing method are highlighted. Theoretical dependences of the distribution of strains and stresses during vibration turning are presented. Photographs of the surfaces obtained after processing, graphs of the average roughness line and the reference length of the profile are presented. Based on the results of practical experiments, various variants of microgeometries are modeled and graphs of dependences on the amplitude-frequency parameters of the processing process are plotted. Recommendations are given on the assignment of amplitude-frequency parameters of vibration turning for various applications of such surface microgeometries.

### Введение

Конструкция большинства различных машин и механизмов содержит в себе пары трения деталей. Таким образом, наличие таких пар трения позволяет передавать, создавать и преобразовывать множество различных движений, например, вращательное или возвратно-поступательное. Для таких соединений необходимо обеспечить стабильное и непрерывное смазывание поверхностей деталей в паре трения. Особенно важно это условие для работы высокоточных и ответственных машинах и механизмах, используемых, например, в аэрокосмической отрасли [1]. Для смазки поверхностей, работающих в различных агрессивных средах, применяют жидкие или твердые виды смазочные материалы. Смазка трущихся поверхностей обеспечивает повышение срока эксплуатации изделия, за счет снижения коэффициента трения и износа микрогеометрии.

Таким образом, к современным деталям, работающим в условиях постоянного трения должны предъявляться высокие требования к шероховатости и микрогеометрии поверхности, одними из таких параметров являются низкое значение шероховатости и высокое значение относительной опорной длины профиля.

Для обеспечения этих параметров существует такое направление механической обработки как, вибрационная обработка – когда микронеровности поверхности сглаживаются под действием вибраций, передаваемых на обрабатывающий инструмент. В настоящее время распространено вибрационное выглаживание поверхностей, в процессе которого микрогеометрия поверхности изменяется под действием вдавливаемого в поверхность детали инструмента в осевом или радиальном направлении, относительно его оси. Как правило частота таких колебаний находится в диапазоне от 10 кГц до 10 МГц [2].

В данной статье рассматривается аналог вибровыглаживания, это метод вибрационной обработки резанием деталей типа вал с вынужденными тангенциальными колебаниями маятникового типа. Метод вибрационной обработки резанием использует значительно меньшие величины частоты колебаний инструмента, что позволяет влиять на процесс обработки, за счет варьирования амплитудно-частотных параметров и получать сложную и контролируемую геометрию обрабатываемой поверхности. Кроме того, инструмент воздействует на обрабатываемую деталь в тангенциальном направлении, что позволяет значительно влиять на процесс обработки, так как при токарной обработке наибольшей является именно тангенциальная сила резания.

Также особенностью этого метода обработки является то, что в процессе резания инструмент колеблется в трех положениях, подобно маятнику, что позволяет ему периодически выходить из зоны резания и охлаждаться. Этот процесс периодического охлаждения режущего инструмента позволит повысить эффективность обработки различных труднообрабатываемых материалов, применяемых, в частности, в аэрокосмической отрасли.

Поверхности, обработанные таким методом, имеют специальные канавки, образованные колебаниями инструмента. В этих канавках в процессе эксплуатации должен задерживаться смазочный материал, для обеспечения постоянного и равномерного смазывания поверхностей. Это позволит снизить коэффициент трения поверхности и повысить сроки эксплуатации деталей, работающих в паре трения.

### **Материалы и методы**

В качестве обрабатываемого материала выбраны образцы из стали марки 12X18H10T – сталь нержавеющей коррозионностойкая аустенитного класса. Эта сталь относится к классу труднообрабатываемых материалов, что сказывается на производительности обработки этого материала и качестве шероховатости обработанной поверхности.

В качестве инструментального материала были использованы сменные многогранные пластины из твердого сплава марки Т5К10.

Вибрационное точение осуществлялось с использованием установки для вибрационного резания, предварительно смонтированной на суппорт токарно-винторезного станка JET GHB-1340A.

Средствами измерения результатов экспериментов являлись: штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89, профилометр TR200 с программным обеспечением, лабораторные весы ВК-300, металлографический микроскоп 4XC с цифровой камерой Levenhuk M500 BASE.

### **Основная часть**

Механическая обработка исследуемого метода заключается в приложении к режущему инструменту вынужденных колебаний определенного диапазона частот – 10-200 Гц, сам инструмент совершает колебания отклоняясь от нулевого положения на определенную амплитуду колебаний – 10-300 мкм.

На рисунке 1 представлена схема колебаний инструмента, на которой представлены 4 положения инструмента: А) нижнее (холостой ход), Б) нейтральное (нулевое положение инструмента), В) верхнее (рабочий ход) и Г) нижнее, после образования профиля канавки. Центром колебаний является точка закрепления инструмента в вибрационной установке.

В момент нахождения вершины инструмента в нижнем положении он выходит из зоны резания, что оказывает влияние на снижение температуры и деформаций поверхности режущей пластины. При нахождении в нулевом положении процесс на доли секунды протекает как при

обычном точении. При переходе в верхнее положение инструмент максимально воздействует на обрабатываемую поверхность, оказывая суммарное воздействие тангенциальной силы резания и вибрационного ускорения на снимаемый слой стружки.

В ходе предыдущих исследований рассматривались воздействия этого метода на поверхности заготовок и процесс обработки в целом. На рисунках 2-5 представлены зоны резания смоделированных процессов обычного и вибрационного точения.

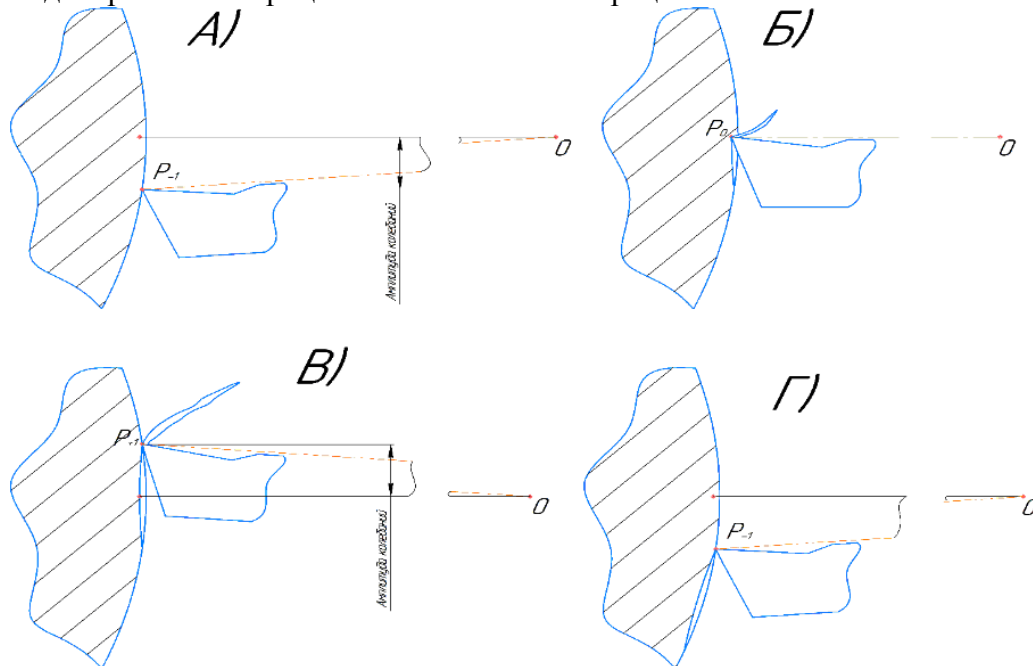


Рис. 1. Схема колебаний режущего инструмента А) нижнее положение инструмента, Б) нейтральное положение инструмента, В) верхнее положение инструмента, Г) нижнее положение инструмента, после образования профиля канавки

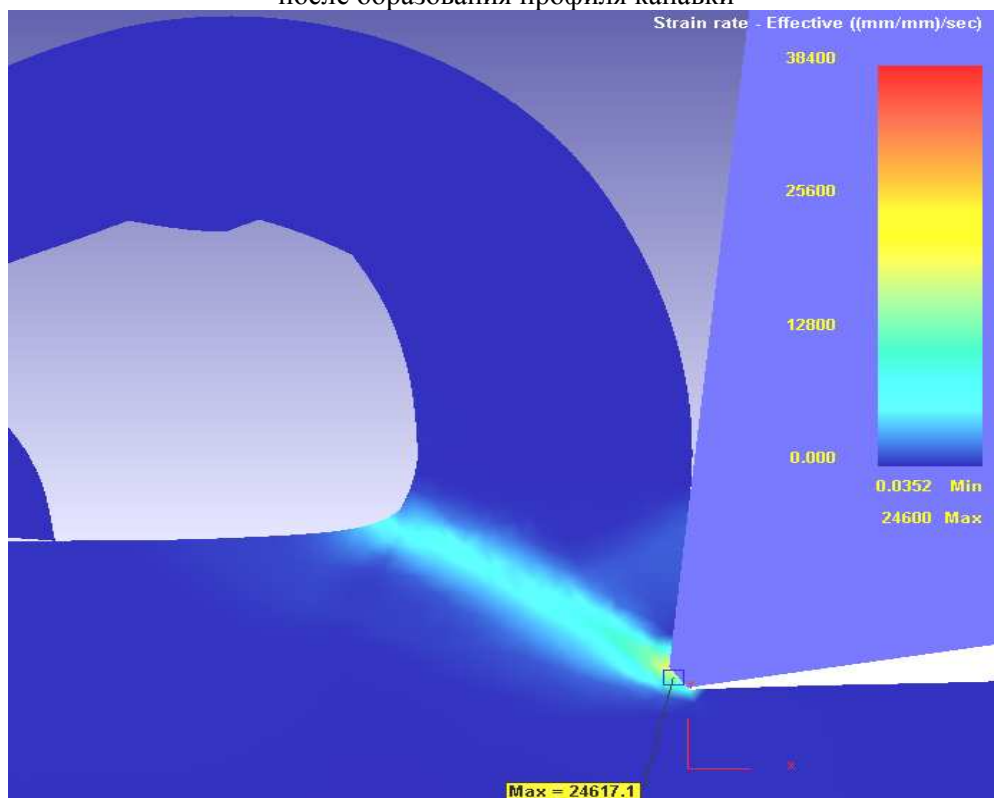


Рис. 2. Скорость интенсивности деформаций при точении

На этих рисунках демонстрируется одна из характеристик процесса механической обработки – скорость интенсивности деформаций.

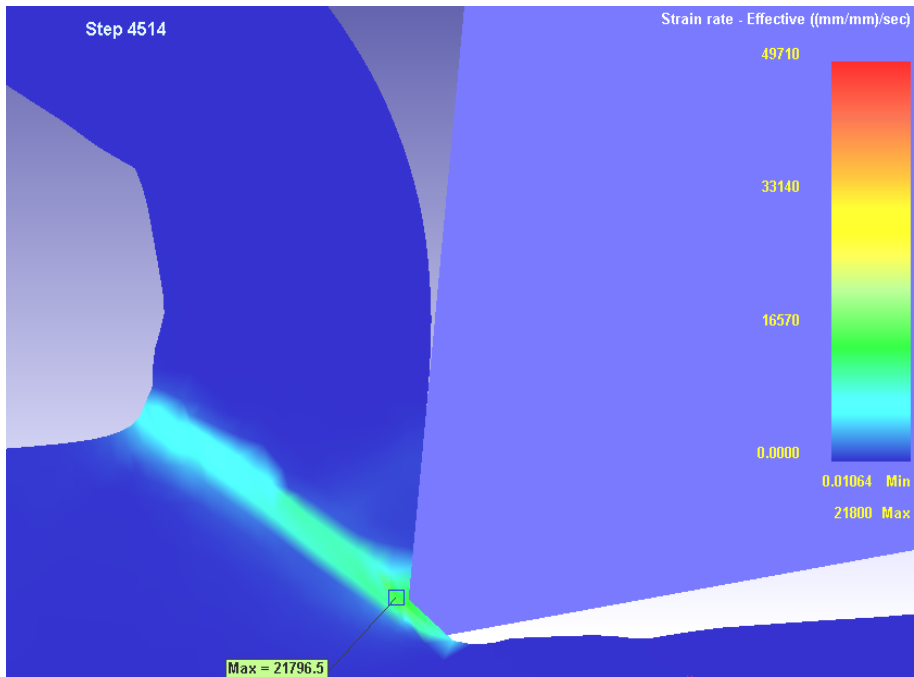


Рис. 3. Скорость интенсивности деформаций при вибрационном точении (в верхнем положении инструмента)

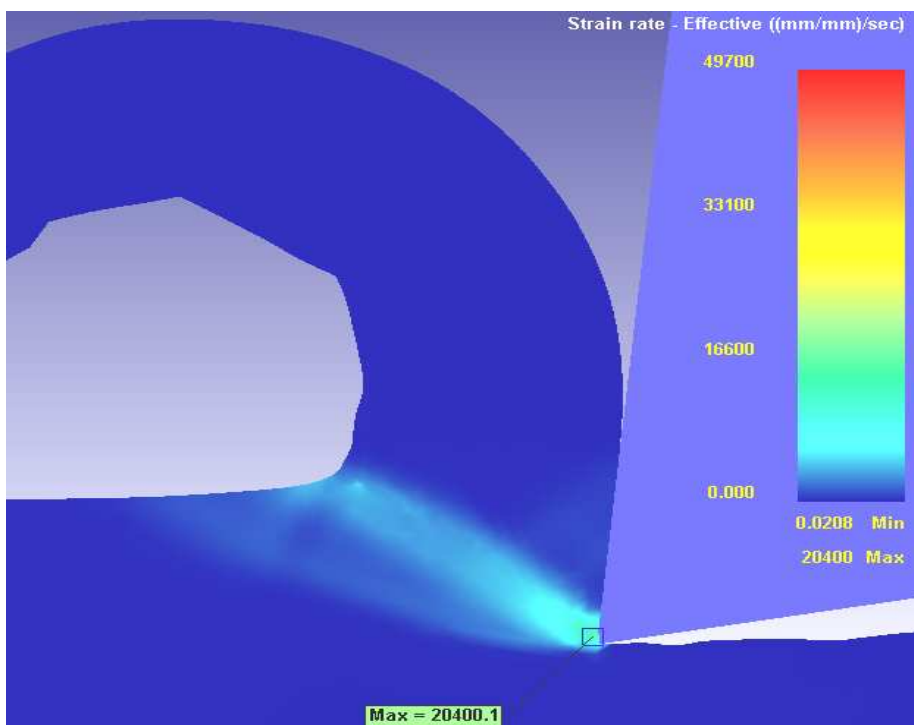


Рис. 4. Скорость интенсивности деформаций при вибрационном точении (в нейтральном положении инструмента)

Эта характеристика отражает, с какой скоростью происходит деформация срезаемого слоя материала заготовки в момент воздействия на него режущей кромки инструмента. Чем выше значения этого параметра, тем быстрее происходит деформация материала в зоне резания, а размеры зоны распределения показывают, насколько глубоко в поверхность заготовки проникают деформации от воздействия режущего инструмента [3].

Кроме того, сравнивая вибрационную обработку (рис. 3-5) с обычным точением (рис. 2), наблюдается процесс образования опережающей трещины. Наиболее отчетливо это наблюдается в нейтральном и нижнем положении инструмента, когда зона распределения

деформаций сначала рассеивается от места врезания режущей кромки инструмента, а затем переходит в зону пластических деформаций, тем самым предварительно деформируя обрабатываемый слой заготовки, создавая условия для протекания процесса образования опережающей трещины [4]. Наличие опережающей трещины при обработке труднообрабатываемых материалов оказывает влияние на производительность процесса и вид получаемой стружки. Так как фактически режущий инструмент находится в зоне резания периодически, то процесс обработки можно считать условно прерывистым, кроме того, опережающая трещина, предварительно деформируя материал заготовки делает его более восприимчивым к разрушению, эти факторы создают условия для получения элементной стружки [5].

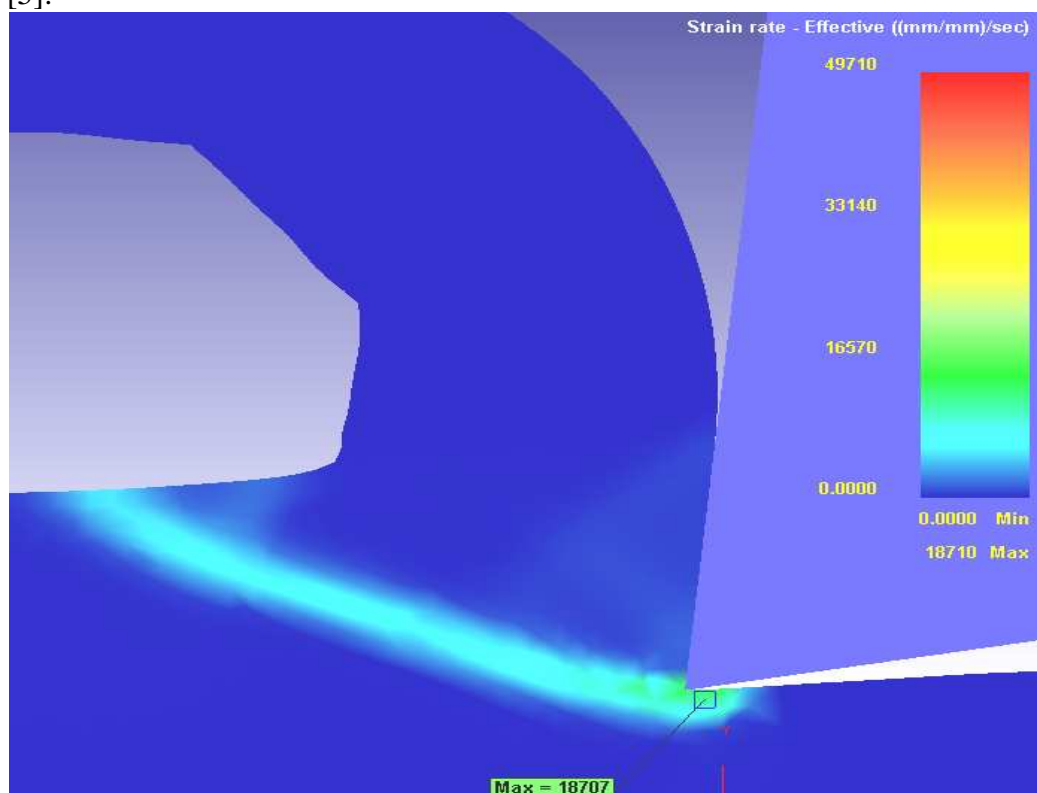


Рис. 5. Скорость интенсивности деформаций при вибрационном точении (в нижнем положении инструмента)

При проведении экспериментов были назначены постоянные параметры процесса, такие как: частота вращения заготовки, продольная подача режущего инструмента, глубина резания, а частотно-амплитудные характеристики изменялись в диапазонах величин, приведенных в таблице 1, таким образом было сформировано 27 режимов обработки.

Стандартные параметры обработки были выбраны из справочных рекомендаций по обработке труднообрабатываемых материалов, а специальные параметры вибрационной обработки выбирались исходя из опыта и зависимостей предыдущих исследований. После обработки образцов этими режимами с помощью профилометра измерялась шероховатость и относительная опорная длина профиля поверхности. В таблице 1 также приведены значения этих параметров для каждого из режимов обработки.

После обработки образцов этими режимами с помощью профилометра измерялась шероховатость и относительная опорная длина профиля поверхности. При измерении профилометром полученные значения шероховатости и относительной опорной длины профиля определялись среднеарифметические значения каждого из показателей для каждого отдельного режима обработки [6].

На основании полученных результатов были построены графики трехмерных поверхностей для значений шероховатости и опорной длины профиля микрогеометрий, обработанных поверхностей.

Табл. 1. Режимы обработки вибрационного точения и численные значения параметров обработанных поверхностей

| № п/п | Скорость резания $V$ , м/мин | Амплитуда колебаний инструмента $A$ , мкм | Частота колебаний инструмента $f$ , Гц | Шероховатость поверхности $R_a$ , мкм | Относительная опорная длина профиля $t_p$ , % (уровень сечения плоскости – 0%) |
|-------|------------------------------|---|--|---------------------------------------|--|
| 1     | 55                           | 10  | 9,6                                    | 5,491                                 | 27,8   |
| 2     |                              |   | 16,7                                   | 6,43                                  | 23,6   |
| 3     |                              |   | 23,9                                   | 8,324                                 | 18   |
| 4     |                              | 30  | 9,6                                    | 5,376                                 | 11,1   |
| 5     |                              |   | 16,7                                   | 8,457                                 | 12,5   |
| 6     |                              |   | 23,9                                   | 20,123                                | 5,3  |
| 7     |                              | 50  | 9,6                                    | 5,741                                 | 12,5   |
| 8     |                              |   | 16,7                                   | 5,674                                 | 15,3   |
| 9     |                              |   | 23,9                                   | 15,865                                | 11,7   |
| 10    | 70                           | 10  | 9,6                                    | 4,016                                 | 23,6   |
| 11    |                              |   | 16,7                                   | 4,58                                  | 23,6   |
| 12    |                              |   | 23,9                                   | 4,199                                 | 12,5   |
| 13    |                              | 30  | 9,6                                    | 5,591                                 | 8,9  |
| 14    |                              |   | 16,7                                   | 6,594                                 | 7,5  |
| 15    |                              |   | 23,9                                   | 12,27                                 | 3,9  |
| 16    |                              | 50  | 9,6                                    | 5,61                                  | 9,7  |
| 17    |                              |   | 16,7                                   | 7,858                                 | 9,7  |
| 18    |                              |   | 23,9                                   | 11,668                                | 6,9  |
| 19    | 85                           | 10  | 9,6                                    | 3,652                                 | 23,6   |
| 20    |                              |   | 16,7                                   | 5,126                                 | 31,9   |
| 21    |                              |   | 23,9                                   | 7,532                                 | 29,2   |
| 22    | 85                           | 30  | 9,6                                    | 5,318                                 | 27,8   |
| 23    |                              |   | 16,7                                   | 6,856                                 | 18,1   |
| 24    |                              |   | 23,9                                   | 13,185                                | 5,3  |
| 25    |                              | 50  | 9,6                                    | 6,308                                 | 16,7   |
| 26    |                              |   | 16,7                                   | 8,551                                 | 10,3   |
| 27    |                              |   | 23,9                                   | 14,735                                | 8,3  |

где постоянные величины – это продольная подача инструмента,  $S=0,26$  мм/об и глубина резания,  $t=0,5$  мм

Рисунки 6-8 отражают зависимость шероховатости поверхности после обработки от амплитудно-частотных параметров вибрационного точения. Изменение шероховатости на всех трех скоростях резания происходит равномерно, что подтверждается подобностью графиков поверхностей. Ключевое отличие заключается в минимальных и максимальных значениях шероховатости измеряемой поверхности.

Так, например, минимальное значение шероховатости поверхности было получено после обработки с 19 режимом обработки и составила 3,652 мкм. После обработки 6 режимом было получено самое большое значение параметра шероховатости – 20,123 мкм.

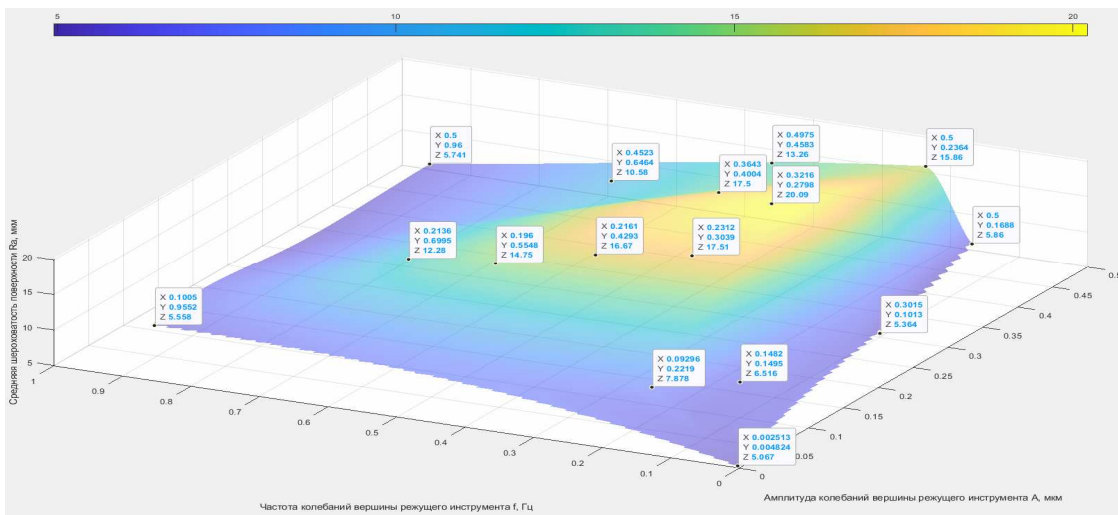


Рис. 6. Шероховатость поверхности после обработки со скоростью резания  $V = 55$  м/мин

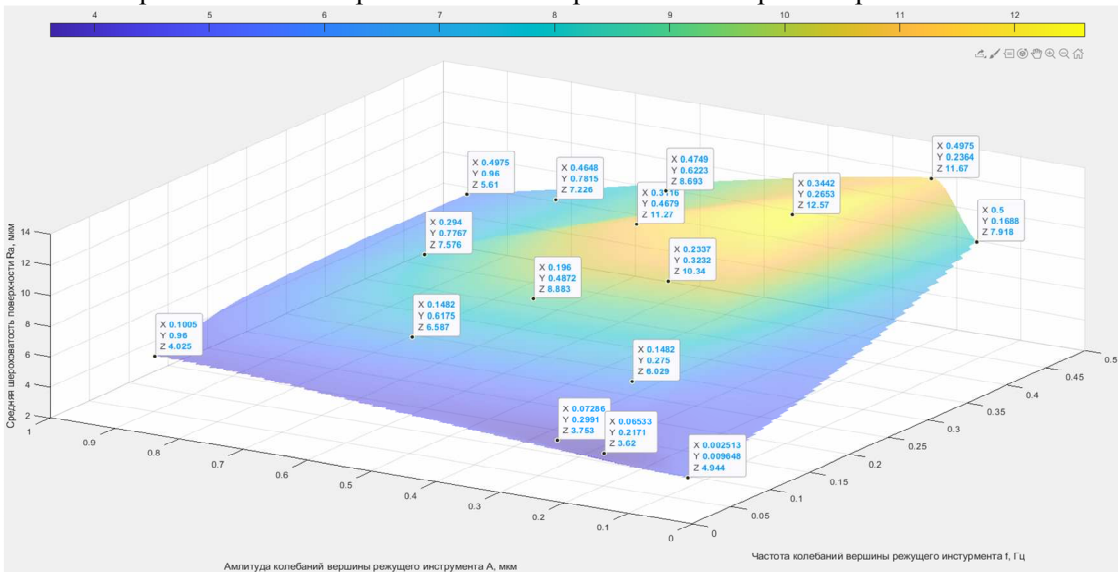


Рис. 7. Шероховатость поверхности после обработки со скоростью резания  $V = 70$  м/мин

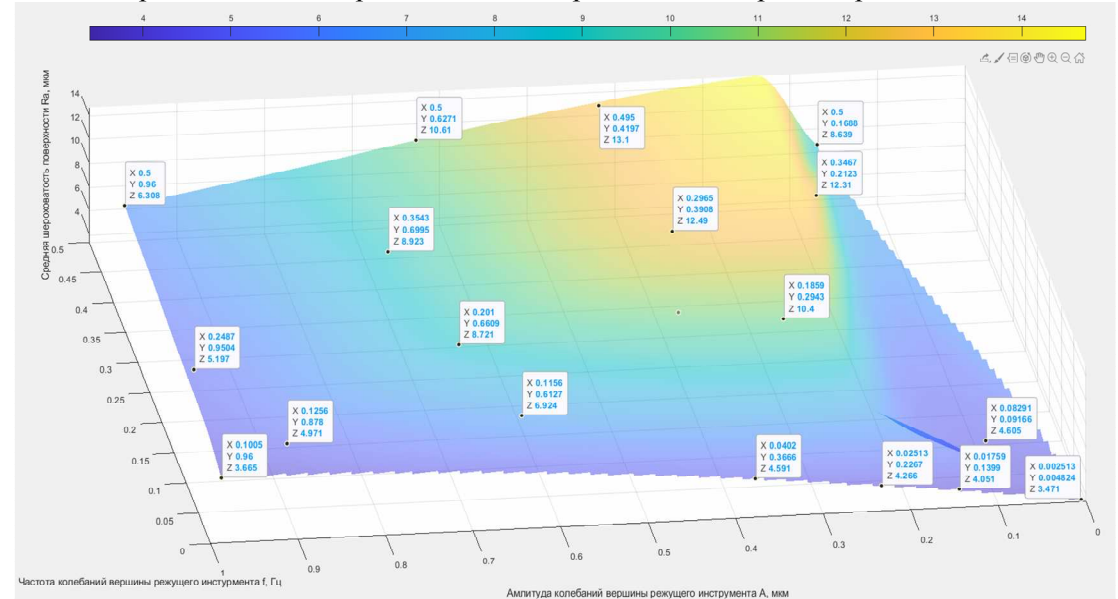


Рис. 8 Шероховатость поверхности после обработки со скоростью резания  $V = 85$  м/мин

Такие значительные отличия в конечных параметрах поверхности зависят от сочетаний амплитуды и частоты во время процесса обработки [7]. Для выбранного материала – стали

12X18H10T, чем выше амплитуда и частота, тем хуже конечные параметры поверхности после обработки, поэтому оптимальными параметрами обработки для этого материала являются диапазоны малых значений амплитуды  $A = 10\text{-}25$  мкм и частоты  $f = 10\text{-}15$  Гц.

Следующим параметром является относительная опорная длина профиля поверхности – этот параметр характеризует фактическую площадь контакта поверхности по отношению к общей площади на момент начала приработки, то есть после последней операции механической обработки [8]. Чем выше этот параметр, тем меньше понадобится времени на приработку детали и большая толщина поверхности останется после окончания приработки. Графики зависимостей этого параметра от величин амплитудно-частотных характеристик представлены на рисунках ниже.

Рисунки 9-11 подтверждают прямую зависимость параметров поверхности от амплитудно-частотных параметров процесса обработки, так как графики достаточно схожи для всех трех скоростей резания. Максимальные значения относительной опорной длины профиля получены при обработке с 20, 21 и 22 режимами обработки, а минимальные с 6, 15 и 24.

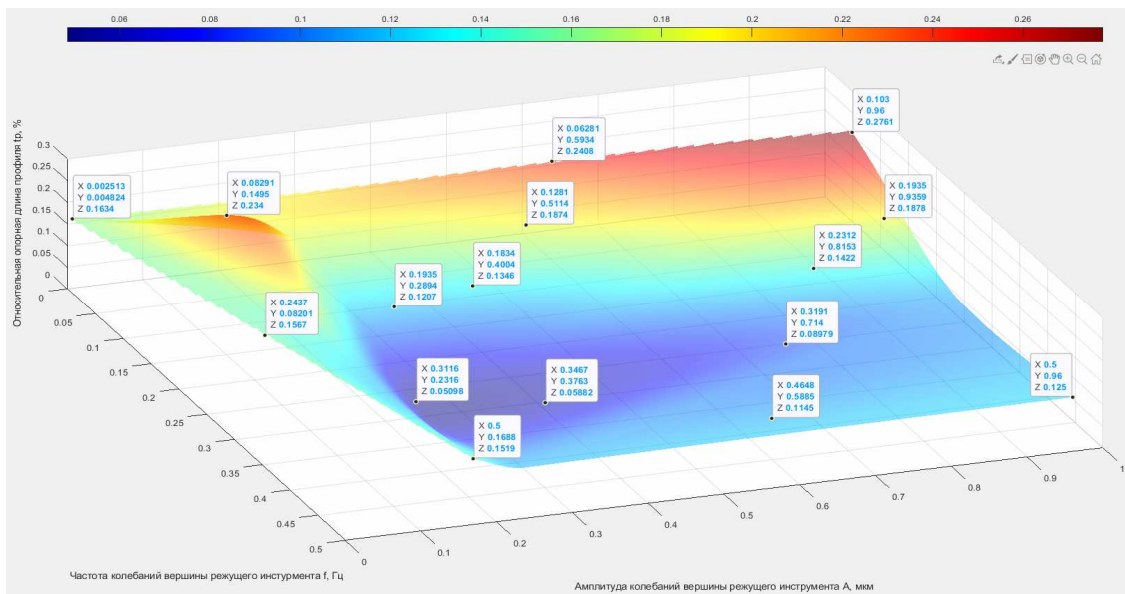


Рис. 9. Относительная опорная длина профиля поверхности после обработки со скоростью резания  $V = 55$  м/мин

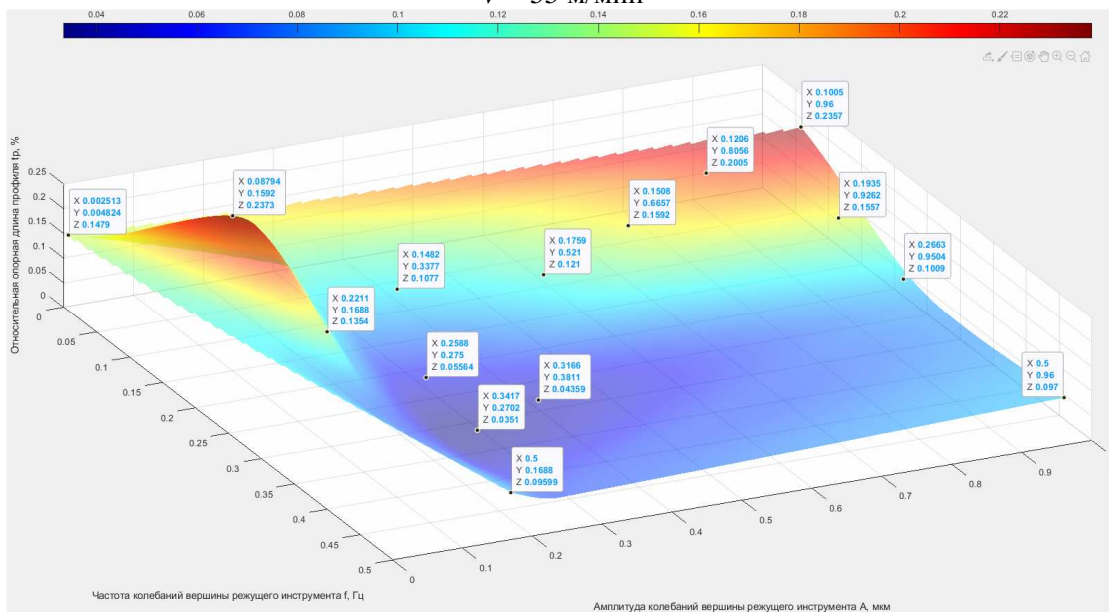


Рис.10. Относительная опорная длина профиля поверхности после обработки со скоростью резания  $V = 70$  м/мин



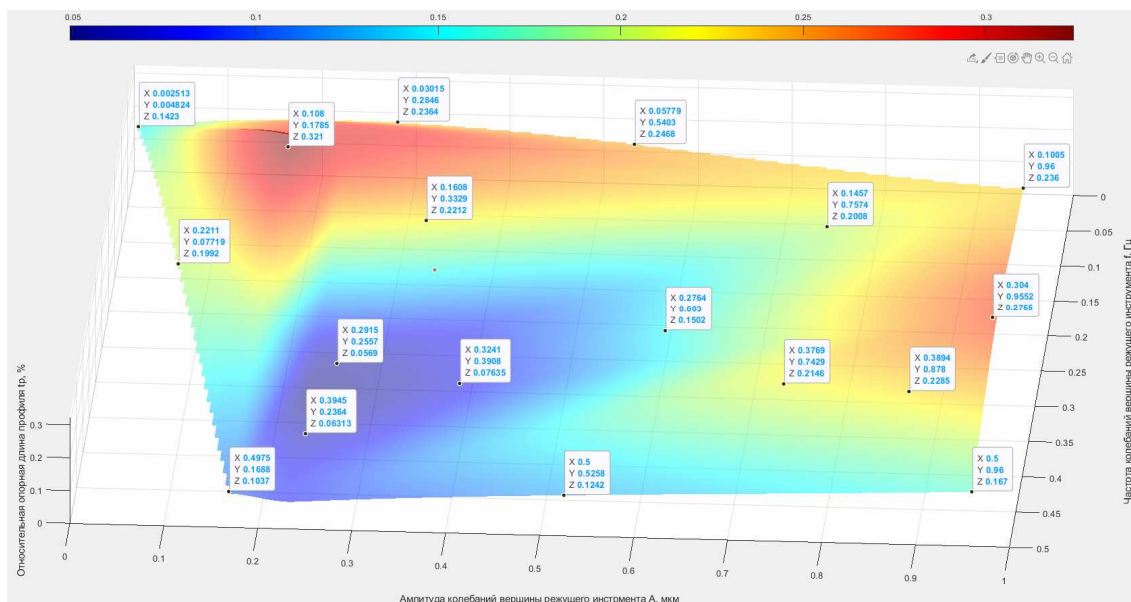


Рис. 11. Относительная опорная длина профиля поверхности после обработки со скоростью резания  $V = 85$  м/мин

Таким образом, оценивая поверхности по этим двум критериям стоит выделить те поверхности, у которых шероховатость и относительная опорная длина профиля имеют приближение к максимальным значениям. Такими режимами обработки являются 11 ( $R_a = 4,58$  мкм,  $t_p = 23,6$  %) и 19 ( $R_a = 3,652$  мкм,  $t_p = 23,6$  %), совместные высокие параметры этих двух величин способствуют повышению эксплуатационных характеристик поверхности деталей в парах трения. У остальных режимов обработки ярко выражен только один из параметров поверхности, следовательно, их нельзя рекомендовать для обработки материалов этого класса, так как высокая шероховатость и малая опорная площадь значительно снижают начальные эксплуатационные характеристики поверхности [9].

Для сравнения реальных микрогеометрий, ниже на рисунках 12-15 показаны фото поверхностей образцов под микроскопом, для более детального рассмотрения полученной микрогеометрии после обработки.

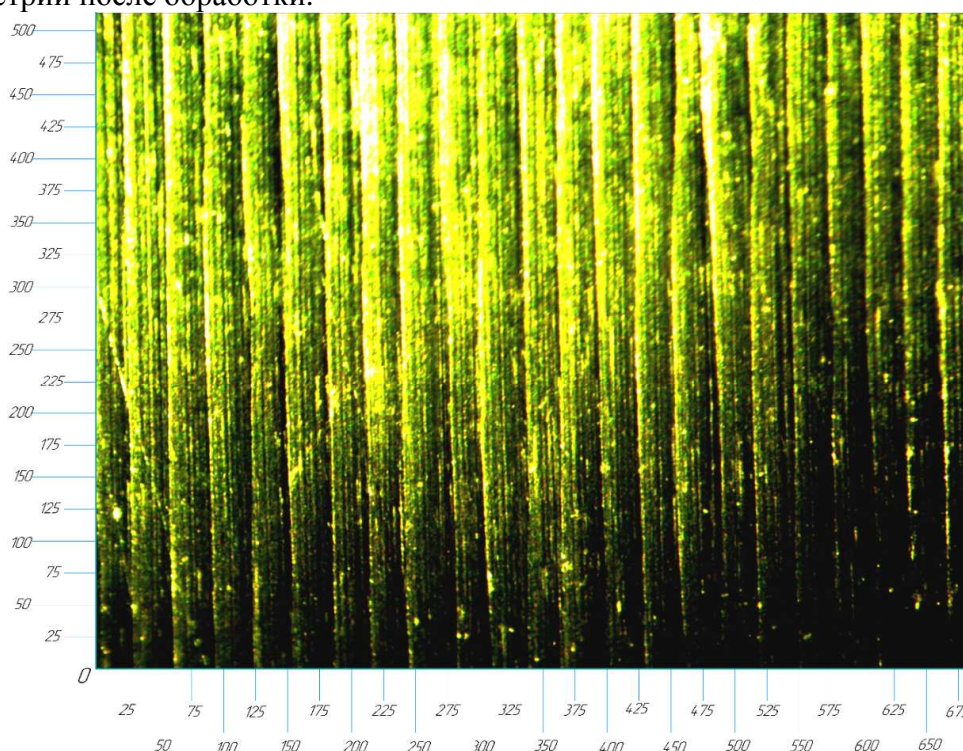


Рис. 12. Фото под микроскопом поверхности образца, обработанного обычным точением

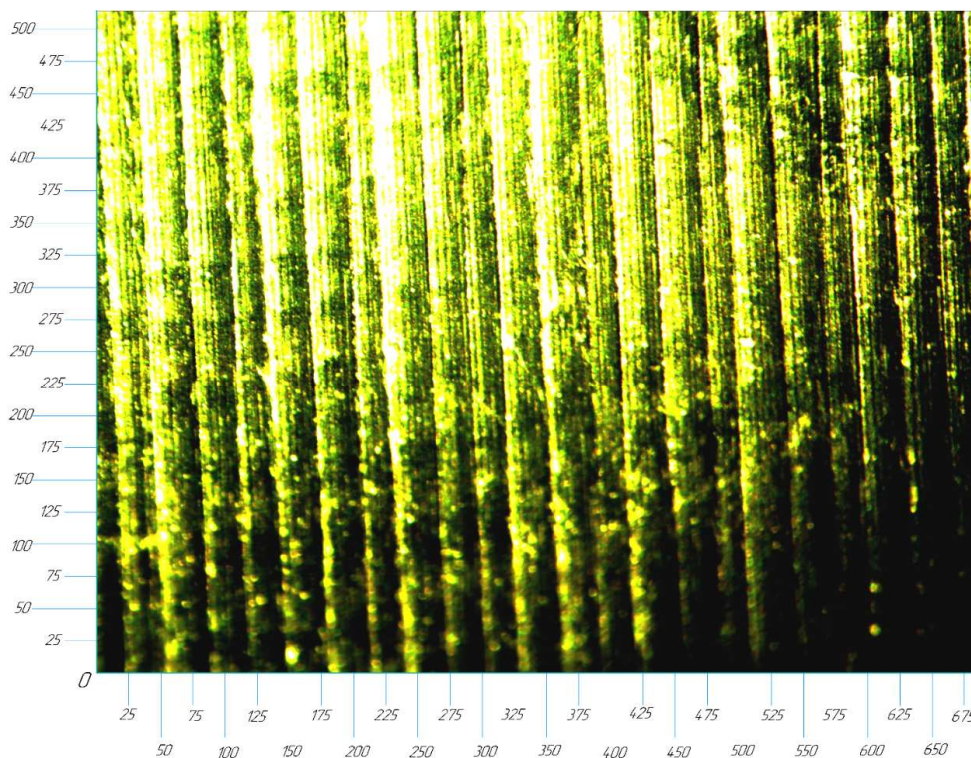


Рис. 13. Фото под микроскопом поверхности образца, обработанного вибрационным точением с частотой колебаний  $f = 9,6$  Гц, амплитудой колебаний  $A = 10$  мкм

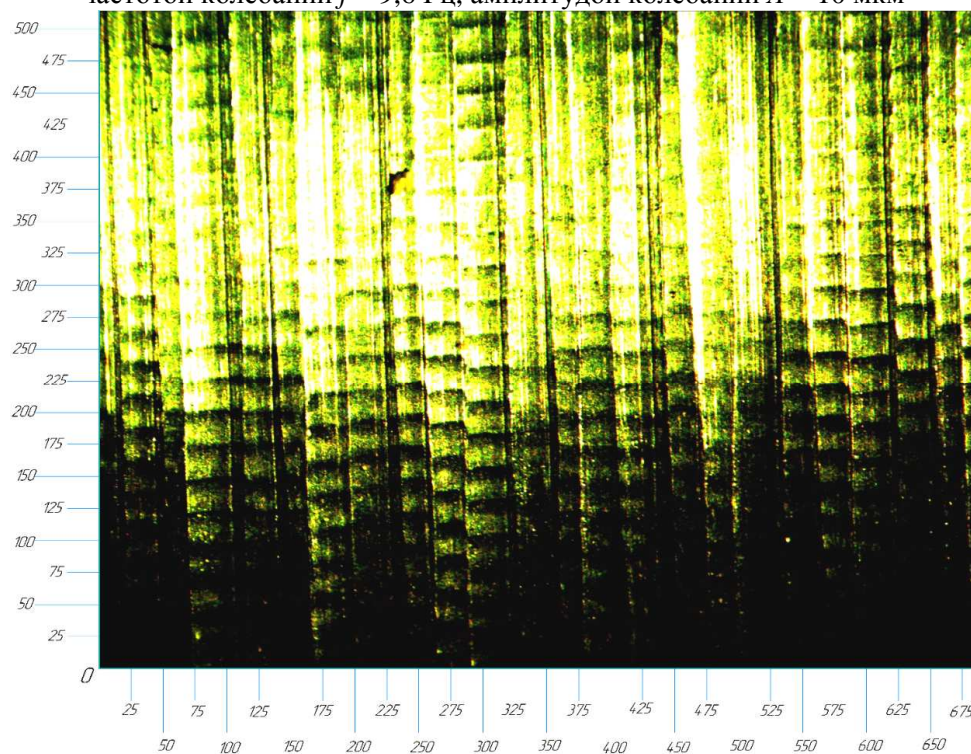


Рис. 14. Фото под микроскопом поверхности образца, обработанного вибрационным точением с частотой колебаний  $f = 16,7$  Гц, амплитудой колебаний  $A = 10$  мкм

На всех четырех рисунках отчетливо видны вертикальные риски на поверхности – это след от продольной подачи инструмента в процессе обработки. Ширина этих рисков одинакова на всех поверхностях, так как подача при обработке была постоянной. При обычном точении на поверхности риск не наблюдается никаких изменений, они практически не отличаются друг от друга. Но на фото поверхностей с вибрационной обработкой видны значительные отличия, они выражаются в появлении на поверхности горизонтальных темных и светлых рисков, являющихся специальными канавками.

На рисунке 13 эти риски выражены не так явно, это связано с малой частотой колебаний этого режима обработки, которая напрямую влияет на количество канавок на обработанной поверхности.

Рисунки 14 и 15 более отчетливо показывают наличие канавок на поверхности, темные участки – это созданные канавки, а светлые – участки необработанной поверхности заготовки. Причем отчетливо видно отличие в поверхности при изменении частоты колебаний, на поверхности с большей частотой количество канавок больше.

Из приведенных фото следует, что действительно увеличение частоты колебаний вершины режущего инструмента влияет на концентрацию специальных канавок на поверхности заготовки.

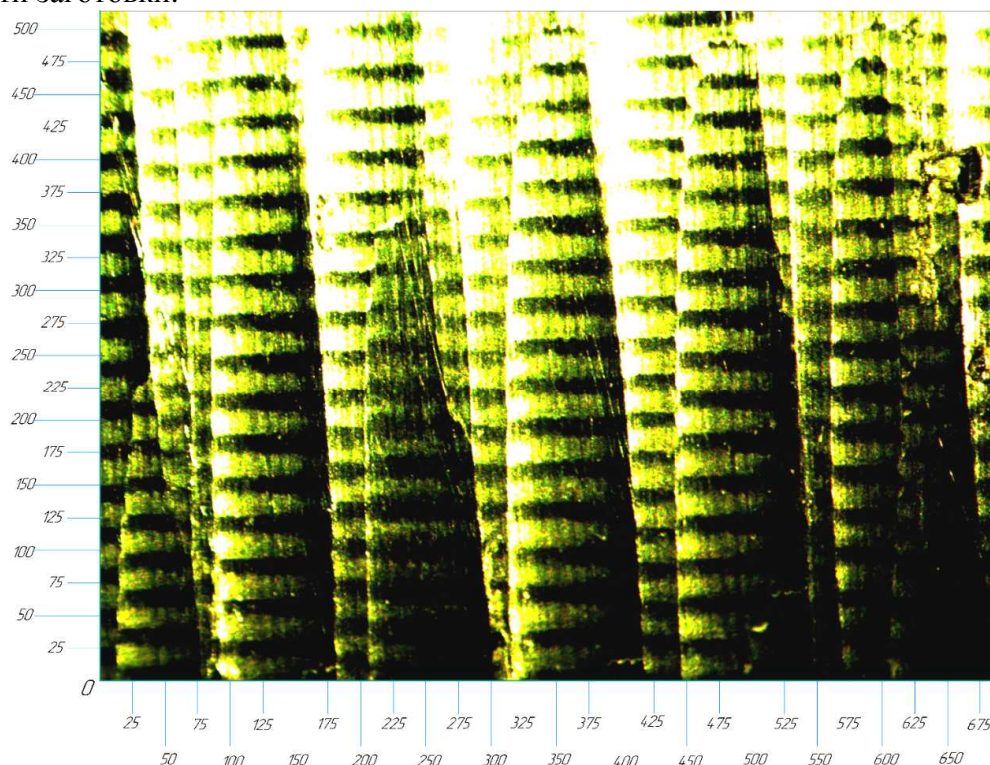


Рис. 15. Фото под микроскопом поверхности образца, обработанного вибрационным точением с частотой колебаний  $f = 23,9$  Гц, амплитудой колебаний  $A = 10$  мкм

После проведения экспериментов и получения зависимостей и результатов, реальные поверхности были воссозданы в среде САПР КОМПАС-3D, для лучшего понимания внешнего вида профиля новой микрогеометрии поверхностей.

На рисунке 16 представлены сгенерированные профили поверхностей после обработки методом вибрационного точения. Эти поверхности отличаются количеством и плотностью специальных канавок, как следствие различно воздействуют на протекание процесса трения для пары деталей. Применение различных профилей микрогеометрий зависит от условий работы поверхности, требуемого коэффициента трения и вида смазочного материала.

Поверхности, представленные выше имеют специальные канавки, которые выполняют роль полостей для смазочного материала. Таким образом трение может переходить из сухого и граничного в режим жидкостного (гидродинамического), что будет уменьшать износ поверхностей трущихся деталей и повышать срок их эксплуатации. Смазочный материал заполняет канавки и за счет этого увеличивается площадь взаимодействия металла и СОЖ. Это способствует образованию пленки с постоянной толщиной на поверхности трения, что обеспечивается подачей из канавок необходимого количества смазочного материала. Во время холостого или обратного хода лишняя смазка наоборот стекает в эти канавки, предотвращая выдавливание и потерю объема, что увеличивает время работы механизма до следующей смазки трущихся поверхностей [10].

Таким образом, смазочный материал разделяет металлические поверхности деталей масляным клином и предотвращает их истирание друг о друга в процессе эксплуатации.

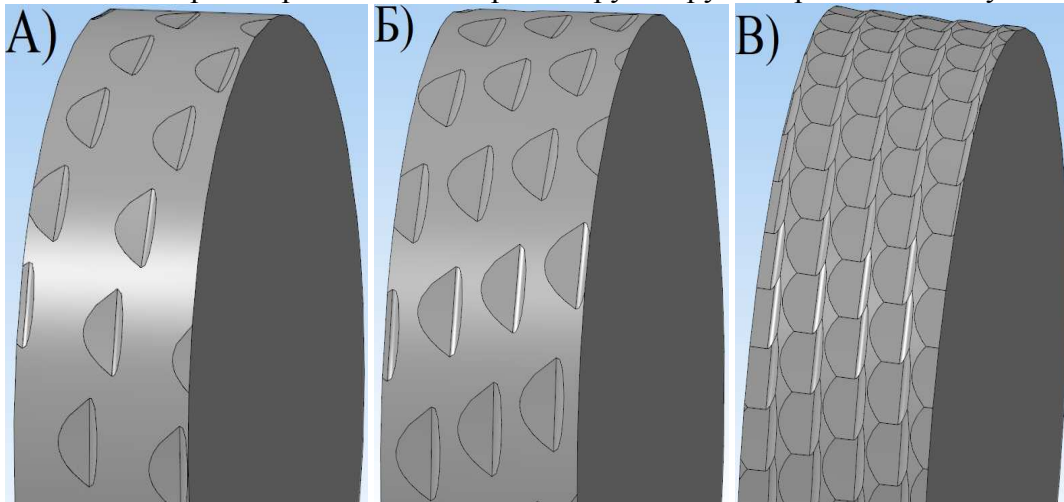


Рис. 16. Смоделированные поверхности после обработки методом вибрационного точения: А) частота колебаний режущего инструмента,  $f=15$  Гц; Б) частота колебаний режущего инструмента,  $f=30$  Гц; В) частота колебаний режущего инструмента,  $f=60$  Гц

### **Выводы**

После проведения исследования, анализа практических экспериментов, построения теоретических зависимостей, моделирования теоретических микрогеометрий поверхностей можно сделать следующие выводы.

Наложение на вершину режущего инструмента тангенциальных вынужденных маятниковых колебаний способствует созданию специальных канавок, в которых при работе может задерживаться смазочный материал. Постоянное наличие смазочного материала в зоне трения и создание масляной пленки обеспечивают переход к жидкостному трению, которое уменьшает износ поверхностей трения и увеличивает период эксплуатации изделия.

Правильный подбор амплитудно-частотных характеристик процесса обработки позволяет улучшить шероховатость поверхности в 1,5-2 раза, а относительную опорную длину поверхности на 10-20 % по сравнению с обычным точением и неоптимальными режимами вибрационной обработки [11].

Поверхности, полученные при помощи исследуемого метода, будут иметь большой ресурс работы и начальные эксплуатационные характеристики, что положительно скажется на их работе в узле или механизме. Эти условия позволят использовать такие детали в ответственных узлах машин, работающих с повышенной точностью или в агрессивных условиях, например, в аэрокосмической, автомобилестроительной, судостроительной и других отраслей с повышенными требованиями к характеристикам изделий.

### **Финансовая поддержка**

Работа выполнена при финансовой поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» рамках договора (соглашения) №17543ГУ/2022 от 29 апреля 2022 г. о предоставлении гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов в рамках реализации инновационного проекта.

### **Список литературы**

1. Shuvam Mohapatra<sup>1</sup>, Amlana Panda<sup>1</sup>, Ramanuj Kumar<sup>1</sup>, Ashok Kumar Sahoo. Recent Trends and Future Perspectives on Vibration Assisted Turning: A Brief Review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 653, pp. 1519.
2. Ezugwu E.O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005, vol. 45, pp. 1353-1367.
3. Balla Srinivasa Prasad, M. Prakash Babu. Correlation between vibration amplitude and tool wear in turning: Numerical and experimental analysis // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2017,

vol. 20, iss. 1, pp. 197-211.

4. Кудинов Е.А., Владимиров А.А., Макаров А.В., Шаповалов А.И. К вопросу о моделировании опережающей трещины при виброточении // Транспортное машиностроение. – 2022. – №03(3). – С. 4-15. – DOI: 10.30987/2782-5957-2022-3-4-15.
5. Pawade R.S., Joshi S.S., Brahmanekar P.K., Rahman M. An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718 // Journal of Materials Processing Technology. 2007, vol. 192, pp. 139-146.
6. Rudranarayana Kandi, Susanta Kumar Sahoo, Ananda Kumar Sahoo. Ultrasonic vibration-assisted turning of Titanium alloy Ti-6Al-4V: numerical and experimental investigations // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2020, vol. 42, no. 399, pp 50-61.
7. Siddhpura M., Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012, vol. 61, pp. 27-47.
8. Zhao Haidong, Zou Ping, Ma Wenbin, Zhou Zhongming. A Study on Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting of Inconel 718 // Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration. 2016, vol. 2016, pp. 11-22.
9. Кудинов Е.А., Владимиров А.А., Шаповалов А.И., Макаров А.В. Влияние параметров вибрационного точения на качество обработанных поверхностей // Сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2022. – С. 103-108.
10. Гаркунов Д.Н., Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. Триботехника: учебное пособие. – М.: КНОРУС, 2013. – С. 38-46.
11. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – Л.: Машиностроение, 1982. – 240 с.

### References

1. Shuvam Mohapatra<sup>1</sup>, Amlana Panda<sup>1</sup>, Ramanuj Kumar<sup>1</sup>, Ashok Kumar Sahoo. Recent Trends and Future Perspectives on Vibration Assisted Turning: A Brief Review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 653, pp. 1519.
2. Ezugwu E.O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005, vol. 45, pp. 1353-1367.
3. Balla Srinivasa Prasad, M. Prakash Babu. Correlation between vibration amplitude and tool wear in turning: Numerical and experimental analysis // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2017, vol. 20, iss. 1, pp. 197-211.
4. Kudinov E.A., Vladimirov A.A., Makarov A.V., Shapovalov A.I. On the issue of modeling a leading crack during vibration turning // Transport Engineering. 2022, no. 03(3), pp. 4-15. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-3-4-15.
5. Pawade R.S., Joshi S.S., Brahmanekar P.K., Rahman M. An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718 // Journal of Materials Processing Technology. 2007, vol. 192, pp. 139-146.
6. Rudranarayana Kandi, Susanta Kumar Sahoo, Ananda Kumar Sahoo. Ultrasonic vibration-assisted turning of Titanium alloy Ti-6Al-4V: numerical and experimental investigations // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2020, vol. 42, no. 399, pp 50-61.
7. Siddhpura M., Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012, vol. 61, pp. 27-47.
8. Zhao Haidong, Zou Ping, Ma Wenbin, Zhou Zhongming. A Study on Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting of Inconel 718 // Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration. 2016, vol. 2016, pp. 11-22.
9. Kudinov E.A., Vladimirov A.A., Shapovalov A.I., Makarov A.V. Influence of vibration turning parameters on the quality of machined surfaces // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. –Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2022. – P. 103-108.
10. Garkunov D.N., Melnikov E.L., Gavrilyuk V.S. Tribotechnics: textbook. – М.: KNORUS, 2013. – P. 38-46.
11. Schneider Yu.G. Operational properties of parts with a regular microrelief. – L.: Mechanical engineering, 1982. – 240 p.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

|   |   |
|---|---|
| <b>Кудинов Егор Алексеевич</b> – студент  | <b>Kudinov Egor Alekseevich</b> – student   |
| <b>Владимиров Александр Андреевич</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры ТОММ            | <b>Vladimirov Alexander Andreevich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of TOMM |
| <b>Шаповалов Антон Иванович</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры ТОММ                  | <b>Shapovalov Anton Ivanovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of TOMM      |
| <b>Макаров Алексей Владимирович</b> – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ТОММ | <b>Makarov Aleksey Vladimirovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor, head of Department of TOMM |
| ekudinov81@gmail.com  |   |

Получена 20.05.2023