

Ким В. А., Щелкунов Е. Б., Бреев С. В.
V. A. Kim, E. B. Schelkunov, S. B. Breev

05.02.07

ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ROUGHNESS OF MACHINED SURFACE DURING SLAB MILLING



Ким Владимир Алексеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-

Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Vladimir A. Kim — Doctor in Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Щелкунов Евгений Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.

Yevgeny B. Schelkunov — PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Бреев Сергей Викторович — аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.

Sergey V. Breev — PhD Candidate at the the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Аннотация: Шероховатость при цилиндрическом фрезеровании определяется кинематикой резания, разрушением срезаемого слоя и трением обработанной поверхностью о заднюю поверхность режущего зуба фрезы. Показана роль каждого механизма и циклический характер их проявления.

Summary: Roughness at slab milling is determined by cutting kinetics, by destruction of the skived layer and friction between the machined surface and the back surface of the milling cutter. Each mechanism's role is revealed along with the cyclic nature of the whole process.

Ключевые слова: Шероховатость, фрезерование, радиус режущего клина, кинематика реза-ния, разрушение.

Keywords: roughness, milling, radius of cutting edge, kinetics of cutting, destruction

Шероховатость при резании материала формируется в результате совокупного влияния копирования рельефа режущего лезвия, отображения на обрабатываемой поверхности траектории перемещения режущего клина относительно заготовки, автоколебания относительно этой траектории, наростообразования, деформации и разрушения материала за счет разрыва атомарных связей. Геометрический фактор формирования шероховатости связан с двумя первыми процессами, и образует организованный рельеф, который можно рассчитать на основе кинематики резания [1-4].

Шероховатость в результате разрушения носит стохастический характер, она связана со структурными изменениями материала при пластической деформации и механикой разрушения. Микронеровности при этом возникают за счет разной ориентации микрорельефов разрушения, локальной пластической деформации, выхода дислокаций и других дефектов кристаллического строения на поверхность. Шероховатость в этом случае может быть раскрыта с позиций микрокинетики разрушения материала [5].

При цилиндрическом фрезеровании наибольшая высота организованного профиля шероховатости определяется по формуле (1), теоретически полученной из допущения, что траекторией перемещения режущей кромки зубьев фрезы является дуга окружности, когда неровности микромасштабного уровня возникают в результате смещения дуг относительно друг друга на величину углового шага [1]

$$H_{\max} = \frac{S_z}{8R}, \quad (1)$$

где H_{\max} — максимальная высота неровности; R — радиус фрезы; S_z — подача на зуб.

Однако действительной траекторией перемещения режущего лезвия зуба фрезы относительно обрабатываемой поверхности является трохоида (удлиненная циклоида), представляющая геометрическую сумму кругового и поступательного движений. Схема формирования организованного теоретического профиля шероховатости при трохоидальной траектории представлена на рис. 1. Уравнение трохойды режущего клина первого зуба в параметрическом виде можно представить

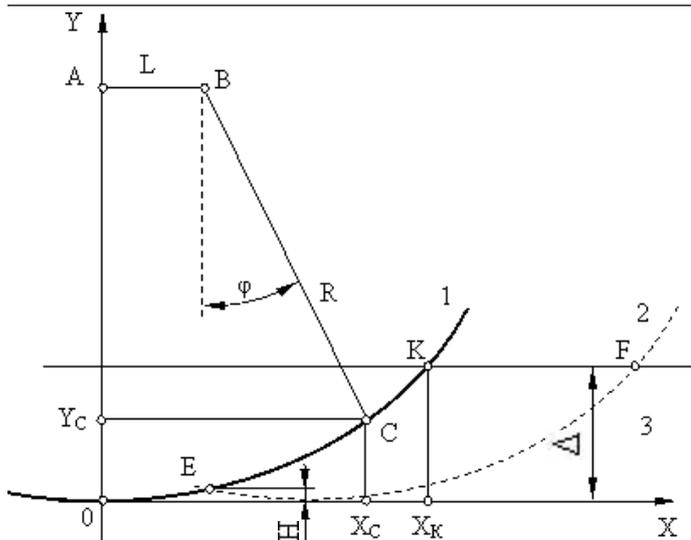


Рис. 1. Схема для определения уравнения движения режущей кромки фрезы относительно заготовки

$$\begin{cases} x = St + R \cdot \sin \omega t \\ y = R(1 - \cos \omega t) \end{cases}, (2)$$

где S — скорость подачи; t — время; ω — угловая скорость фрезы.

Следующий за ним зуб вступает в процесс резания с временным отставанием, пропорциональным угловому шагу между ними. Начало его врезания в обработанную поверхность происходит в точке E .

Обработанная поверхность в результате фрезерования будет складываться из совокупности трохойдальных сегментов, образующих периодически организованный рельеф отклонений от плоскостности. Максимальная высота и шаг неровности принимают значения

$$\begin{cases} p = S_z \\ H_{\max} = R - \sqrt{R^2 - \frac{S_z^2}{4}} \end{cases} (3)$$

Расчеты показывают, что численные значения неровностей H_{\max} могут достигать несколько микрометров и составлять незначительную долю в реальной шероховатости поверхности. Но, как будет показано ниже, кинематика фрезерования оказывает самое активное влияние на шероховатость обработанной поверхности через каналы деформационного процесса.

В реальных условиях резания режущий клин зуба фрезы имеет радиус закругления, величина которого меняется в зависимости от степени износа инструмента. Процесс среза стружки начинается только при превышении толщины удаляемого слоя радиуса закругления, а до этого момента будет иметь место только пластическое смятие обрабатываемого материала. На рис. 2, а представлена схема разделения потоков обрабатываемого материала у вершины режущего клина, имеющего радиус закругления при прямолинейном перемещении инструмента и постоянной толщине срезаемого слоя. При фрезеровании режущая кромка перемещается по трохоиде. Это равносильно тому, что толщина срезаемого слоя не является постоянной (рис. 2, б), и приводит к изменению кинематического переднего угла γ , поэтому точка разделения потоков U может смещаться вдоль кривой закругления режущего клина. В зоне разделения потоков обрабатываемый материал испытывает растягивающие напряжения, и там может возникать «опережающая» трещина или «разрыхленная» область пластического разрушения.

Поток J_1 формирует стружку и подвергается сжатию и сдвигу, а поток J_2 — смятию. В результате обработанная поверхность подвергается деформационному упрочнению, величина которого зависит от радиуса закругления режущего клина, толщины срезаемого слоя

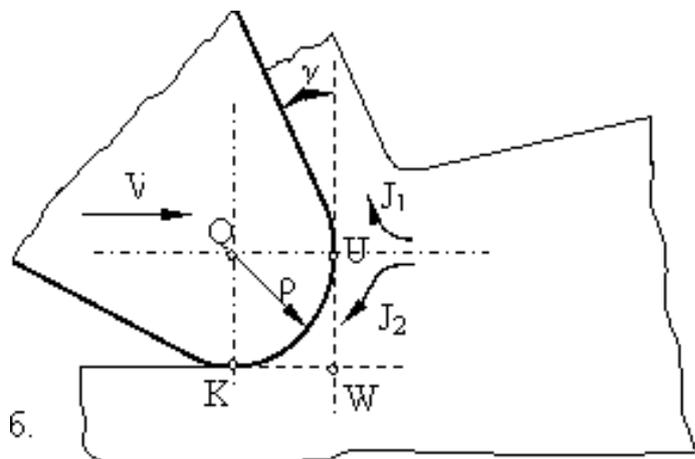
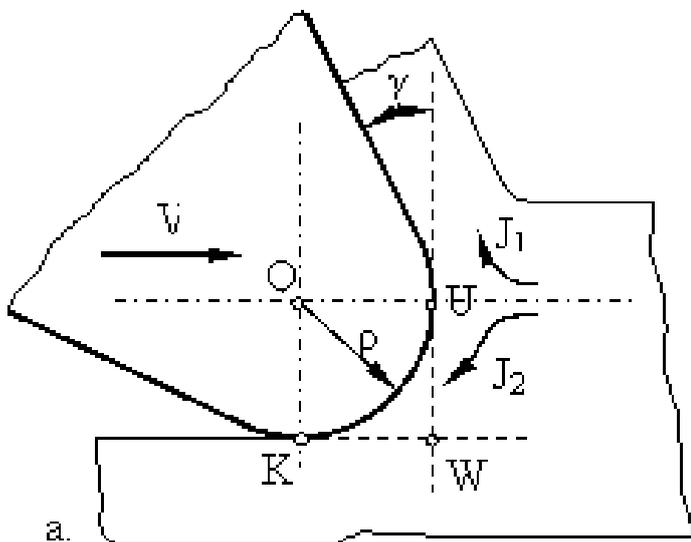


Рис. 2. Геометрия режущего клина и разделение потоков срезаемого слоя: а — при постоянной толщине срезаемого слоя; б — при переменной толщине срезаемого слоя

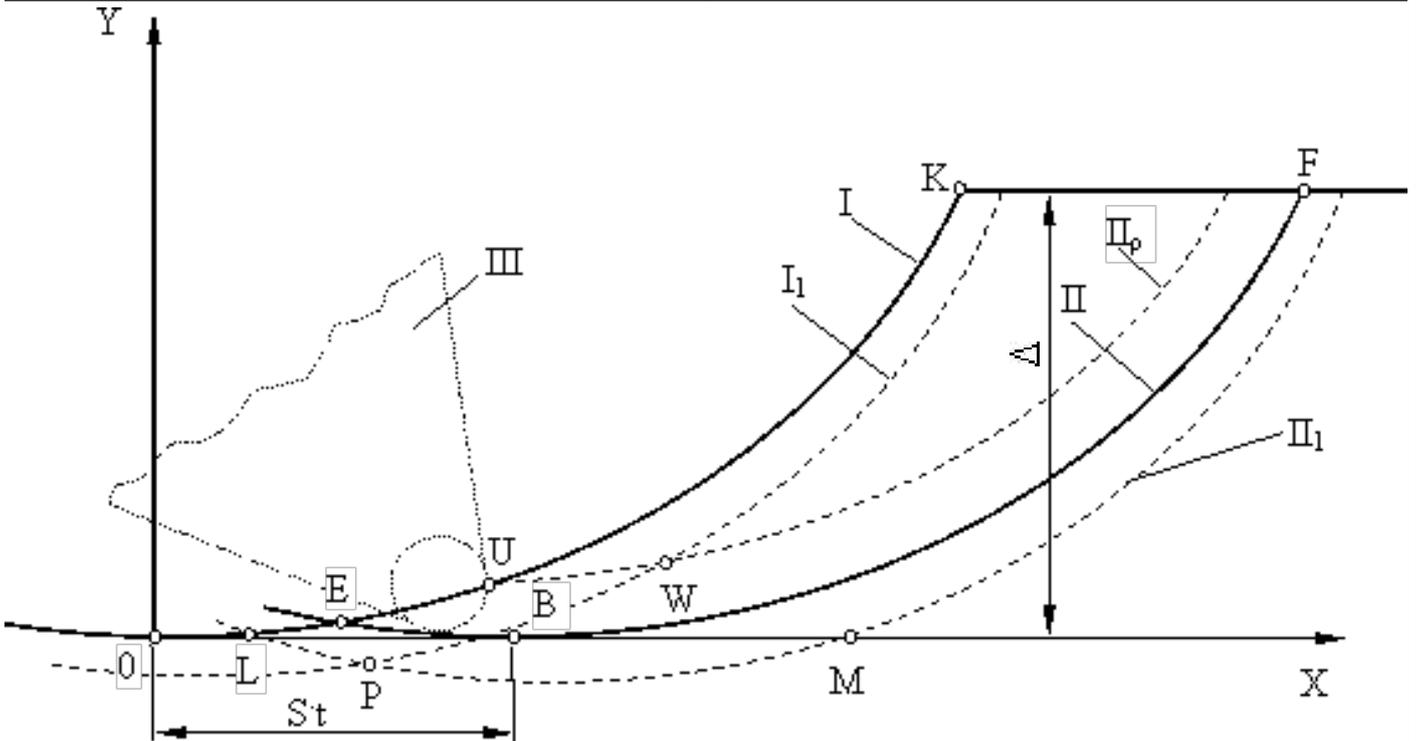


Рис. 3. Схема развития деформированного слоя на обработанной поверхности

и физико-механических свойств обрабатываемого материала. В реальном процессе разделение потоков J1 и J2 будет происходить значительно позже, чем условие достижения толщины срезаемого слоя величины радиуса закругления режущего клина. При фрезеровании относительно хрупких материалов происходит разделение потоков J1 и J2, связанное с упруго-пластической деформацией материала и достижением в зоне разрыва напряжений, равных пределу прочности на растяжение, а при обработке относительно вязких материалов — напряжений, равных пределу текучести на сдвиг. Характер пластической деформации в мо-

мент разделения потоков также будет отличаться в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала. При резании хрупких материалов разделение потоков J1 и J2 сопровождается развитием «опережающей» трещины, направленной по вектору скорости резания, а при фрезеровании пластичных материалов — образованием полос скольжения, ориентированных под углом $\pi/4$ к вектору скорости резания, а при обработке вязких материалов — развитием «разрыхленной» зоны. Теоретически определение периода начала разделения потоков J1 и J2 представляет сложную задачу, поэтому при схематизации деформационных процессов будем считать, что условие разделения определяется равенством толщины срезаемого слоя радиусу закругления режущего клина.

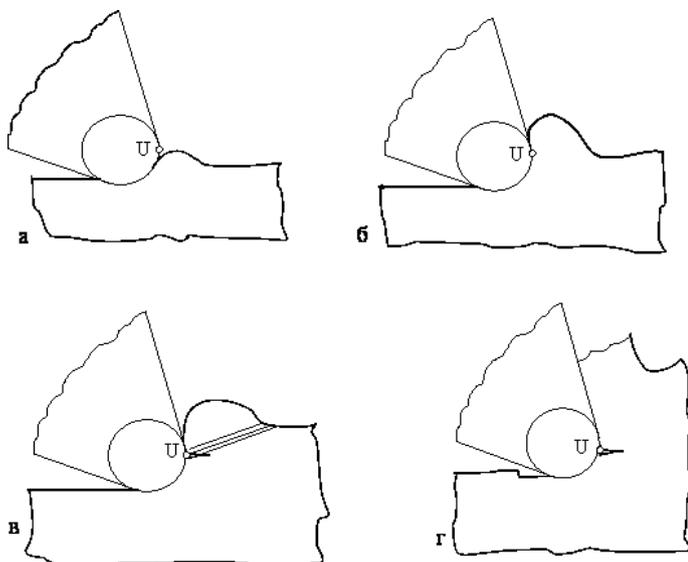


Рис. 4. Основные стадии развития упруго-пластической волны

На рис. 3 показано формирование упрочненного пластическим деформированием слоя обработанной поверхности. При резании первым зубом контур обработанной поверхности определяется линией I, а глубина упрочненного слоя определяется линией I1. Следующий за ним зуб формирует поверхность II и границу упрочненного слоя II1. Срезаемый слой начинает формироваться в точке U, при этом граница разделения потоков J1 и J2 будет соответствовать линии IIр. Линия IIр располагается эквидистантно линии II на расстоянии радиуса закругления ρ . Линии I1 и II1 проходят эквидистантно соответственно линиям I и II. Тогда упрочненный слой будет состоять из областей, ограниченных дугой LM, смещенных относительно друг друга на величину шага ρ между вершинами выступов E.

Объем материала, ограниченный областью EKF, будет подвергаться двойному пластическому деформированию, первый раз при образовании обработанной поверхности в основном смятием, а вто-

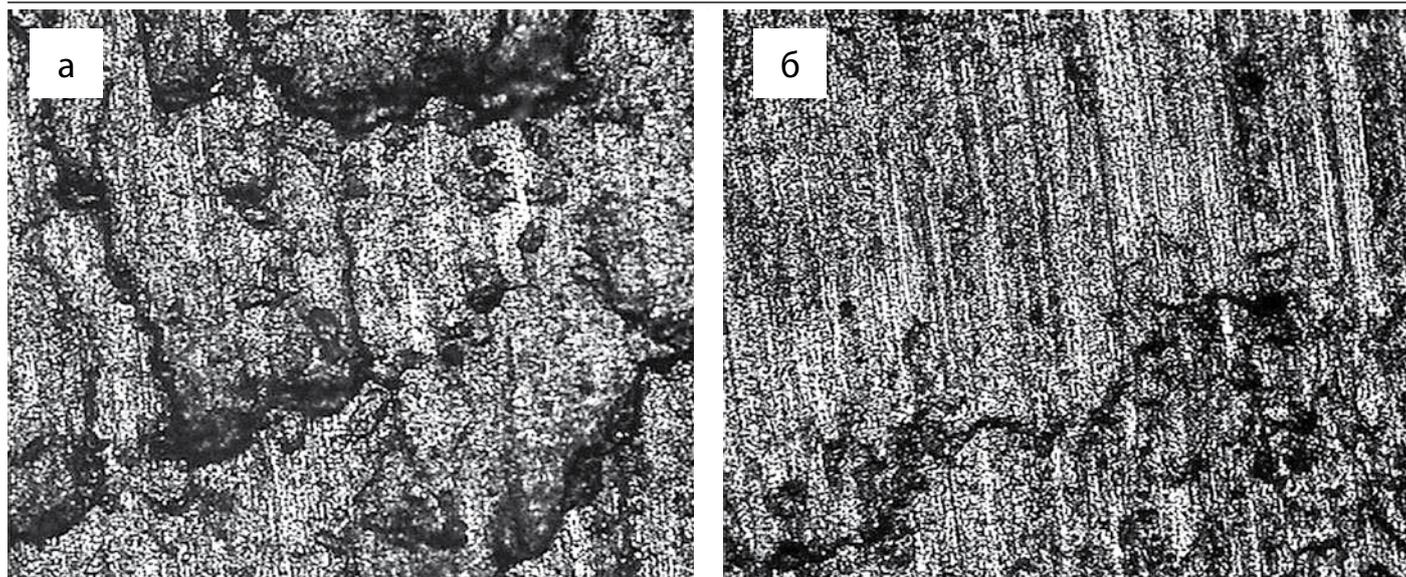


Рис. 5. Зона начала образования стружки при фрезеровании У8 на различных подачах на зуб: а — подача 35 мм/мин; б — подача 390 мм/мин

рой — при удалении стружки, и, следовательно, большем деформационном упрочнении. Зона LEBP является частью обработанной поверхности, которая подвергается двойному смятию, если ширина этого слоя LB превышает подачу на зуб, то вся обработанная поверхность будет складываться из фрагментов двойного смятия.

Микронеровность обработанной поверхности определяется характером пластической деформации при смятии и врезании режущего клина. Сечение удаляемого слоя в случае остро заточенного режущего клина представляет треугольник EKF, ограниченный двумя дугами EK и EF и прямым отрезком FW (рис. 3). Толщина удаляемого слоя определяется до точки К разностью координат линий I и II, и после точки К разностью координат отрезка FW и линии II. Или то точки К

$$\delta(y)_{EF} = R \left[\cos \omega t - \cos \omega \left(t - \frac{\Phi_L}{\omega} \right) \right] \quad (4)$$

и после точки К

$$\delta(y)_{FW} = \Delta - R \left[1 - \cos \omega \left(t - \frac{\Phi_L}{\omega} \right) \right] \quad (5)$$

При учете радиуса закругления режущего клина и разделения потоков обрабатываемого материала толщина удаляемого слоя уменьшается на величину радиуса закругления.

Из выражений (4) и (5) следует, что при срезании удаляемого слоя его толщина до точки К увеличивается, а затем снижается до нуля. Пропорционально площади сечения срезаемого слоя меняются напряжения, действующие на режущий клин, являющиеся основной причиной циклирования силы фрезерования. Переменность сечения срезаемого слоя приводит к тому, что деформационные и геометрические характеристики стружкообразования принимают раз-

ные значения в каждый момент времени.

Разделение удаляемого слоя на два массовых потока J1 и J2 приводит к тому, что процесс резания начинается не в точке E контакта режущего клина с заготовкой, а в точке U, координаты которой вычисляются

$$\begin{cases} X_U = \frac{S\Phi_L}{\omega} + r = \frac{2\pi S}{Z\omega} + r \\ Y_U = R + r - \sqrt{R^2 - \frac{S^2\Phi_L^2}{4\omega^2}} \end{cases} \quad (6)$$

Началу образования срезаемого слоя предшествует появление упругопластического вала, основные этапы развития которого схематично приведены на рис. 4. Упругопластический вал возникает впереди режущего клина за счет его упругого внедрения и отеснения срезаемого слоя. Упругопластический вал и примыкающая к нему область содержит повышенное значение упругой и внутренней энергии, которая в основном концентрируется вокруг дефектов кристаллического строения и носителей пластической деформации [6]. По мере повышения толщины срезаемого слоя возрастают контактные нагрузки и расширяется зона распространения упругопластической деформации, пропорционально которой увеличивается и энергия упругой деформации. Когда толщина срезаемого слоя превысит радиус закругления режущего клина, то в локальной области точки U возникают растягивающие напряжения. С дальнейшим внедрением режущего клина растягивающие напряжения достигают величин, превышающих предел прочности на растяжение, в результате образуется «опережающая» трещина, другие виды потери сплошности материала или происходит пластический сдвиг. Учитывая, что обрабатываемый материал подвергается сильно-

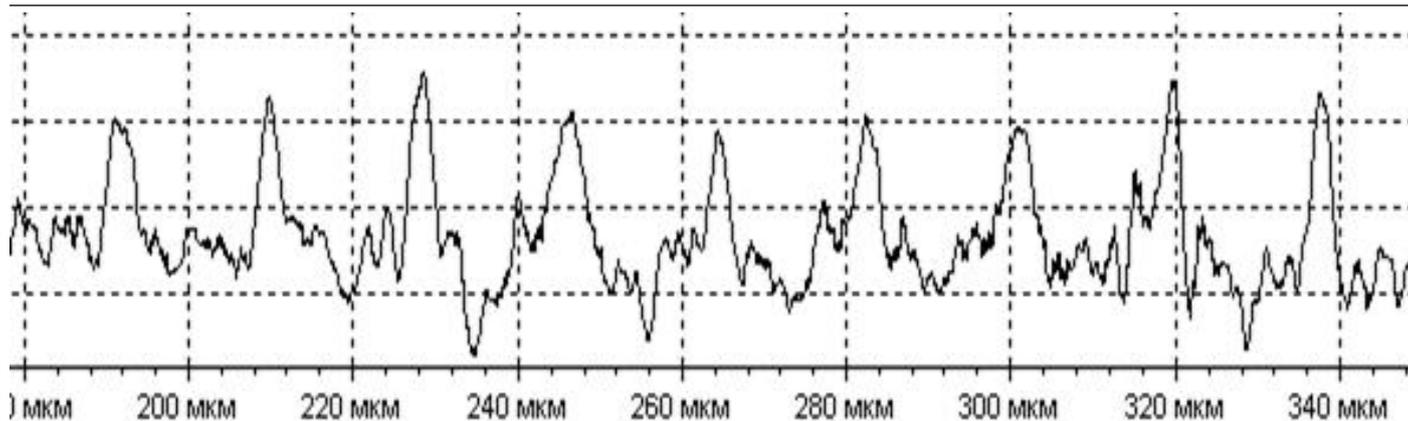


Рис. 6. Фрагмент профилограммы (материал У8, 35 мм/мин)

му деформационному упрочнению наиболее вероятно развитие «опережающей» трещины.

Образование «опережающей» трещины сопровождается импульсным выбросом упругой энергии, пропорциональной объему деформированной области. Направление развития трещины совпадает с вектором истинной скорости резания в точке U . При этом длина трещины в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала может достигать значительных величин, а ее «берега» несут следы хрупкого разрыва. Зона распространения трещины, проходя через область контактного взаимодействия обработанной поверхности с задней поверхностью режущего клина, подвергается дополнительному искажению за счет наложения на нее упругопластического вала. Учитывая, что в этот момент величина упругой составляющей напряженного состояния зоны стружкообразования достигает максимума, то при разделении потоков $J1$ и $J2$ возникает неровность в виде ступеньки со следами разрыва материала. При выходе обработанной поверхности из зоны контакта с задней поверхностью режущего клина происходит упругое восстановление, величина которого пропорциональна абсолютной деформации срезаемого слоя. Поэтому величина упругого восстановления принимает наибольшее значение в зоне разделения потоков $J1$ и $J2$.

На самой обработанной поверхности эти неровности носят организованный периодический характер, шаг которых соответствует подаче на зуб, а возникающая при этом неровность значительно превосходит теоретическую кинематическую составляющую.

Процессы наростообразования вносят дополнительную лепту в развитие шероховатости. Наиболее высокая активность адгезионных процессов наблюдается при максимальных контактных напряжениях, которые имеют место в момент разделения потоков $J1$ и $J2$ и образования «опережающей» трещины. В этот момент следует ожидать наличие наибольшего нароста. Образование трещины вызывает динамический импульс, в результате чего нарост срывается и переносится на обработанную поверхность, подвергается пластическому смятию при взаимодействии с задней поверхностью режущего клина, оставляя на обрабо-

танной поверхности неровность.

На рис. 5 приведена макроструктура обработанной поверхности при различных режимах фрезерования, на которых четко просматриваются следы пластических деформаций, наростообразования и фрикционных контактных процессов.

Представленный на рис. 6 фрагмент профилограммы, снятый в направлении движения инструмента, показывает, что шаг микронеровности носит организованный характер в строгом соответствии с кинематикой фрезерования, а высота микронеровности значительно превосходит H_{max} и несет следы пластической деформации и наростообразования.

На основании изложенного можно сделать следующее заключение.

Геометрический фактор, связанный с кинематикой фрезерования, не оказывает существенного влияния на шероховатость обработанной поверхности, но играет активную роль в процессах пластической деформации при формировании стружки и смятия поверхностного слоя. Возникающая при этом зона развития «опережающей» трещины и вал упругопластической деформации впереди режущего клина создает на обработанной поверхности неровности микро-, мезо- и макромасштабного уровня, шаг которых носит организованный характер, соответствующий подаче на зуб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. — 344 с.
2. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. — М.: Машиностроение, 1981. — 244 с.
3. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностроительных и приборостроительных спец. Вузов. — М.: Высшая шк., 1985. — 304 с.
4. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. — М.: Машгиз, 1954. — 368 с.
5. Хецберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов: Пер. с англ./Под ред. И.Л. Бернштейна и С.П. Ефименко, — М.: Металлургия, 1989. — 576 с.
6. Балохонов Р.Р., Болеста А.В., Бондарь М.П. и др. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах/отв. ред. В.Е. Панин. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. — 520 с.