

УДК 621.9

В.М. Тихонов, Е.А. Уткин

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН РЕЗАНИЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изложены результаты исследований процесса формирования поверхностных слоёв деталей машин, получаемых лезвийной обработкой. Исследуются микрорельефы шероховатости поверхности в продольном направлении, это даёт возможность оценить структуру получаемой поверхности и попытаться понять процессы, происходящие при резании. Поставлены эксперименты на скоростях от 1,5 - 12 м/с и 0,00068 м/с. Подтверждено возникновение трещин на скорости 1,5 м/с.

Ключевые слова: резание металлов, продольная шероховатость, трещина, переходная зона, индентирование, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ).

В современном машиностроении одним из лимитирующих факторов является качество выпускаемой продукции. Время работы деталей машин напрямую зависит от показателей качества, поэтому заинтересованность в их высоких показателях способствует исследованиям в этом направлении. Одним из показателей, к которым предъявляются высокие требования, является шероховатость обрабатываемых поверхностей деталей машин при использовании лезвийной обработки.

Одной из первых работ по изучению микрогеометрии поверхности детали, обработанной лезвийным инструментом, была работа Исаева А.И. В ней рассмотрен вопрос взаимосвязи микрогеометрии поверхности в продольном и поперечном направлениях. Было установлено, что при обработке некоторых марок конструкционных сталей в некотором диапазоне скоростей резания наблюдается образование весьма плохой геометрии при измерении ее в направлении среза.

В работе [1] на основании экспериментальных исследований системы резания получены достаточно общие закономерности влияния скорости резания. Проведённые исследования показывают ограниченное уменьшение величины шероховатости обработанной поверхности при широком диапазоне изменения режима резания. В работе [2] был получен график зависимости шероховатости от скорости резания (рис. 1).

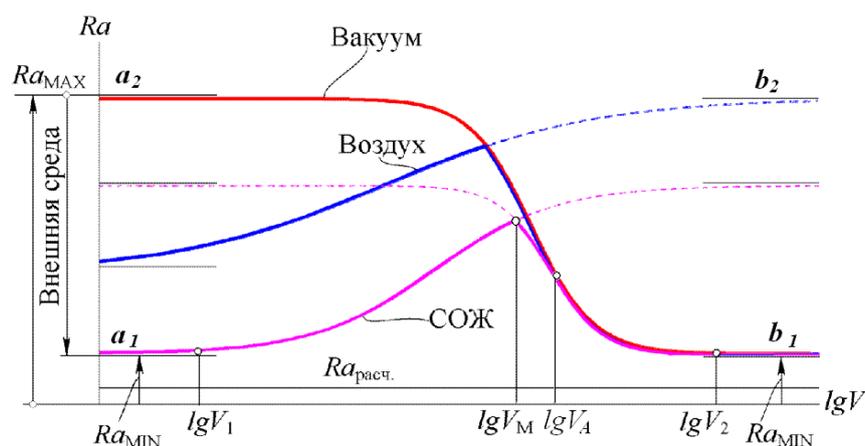


Рис. 1. Зависимость поперечной шероховатости от скорости

Левая часть зависимости показывает влияние окружающей среды на процесс резания и шероховатость получаемой поверхности. Обработка поверхности в условиях вакуума ха-

рактируется некоторым критическим давлением. При давлении, меньшем критического, имеет место взаимодействие ювенильных металлических поверхностей, что характеризуется уменьшением нагрузок, необходимых для схватывания металлов. В результате чего происходит образование вторичных пластически деформированных зон на фрикционных контактах (зон пластического контакта, застойных зон, нароста и т.д.) с образованием новых поверхностей раздела, подменяющих переднюю и задние поверхности. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей всегда способствует уменьшению схватывания (адгезионного взаимодействия) и уменьшению пластичности обрабатываемого материала, что ведёт к улучшению шероховатости поверхности.

При увеличении скорости шероховатость Ra увеличивается и достигает максимума на скорости V_M . Далее изменение шероховатости происходит согласно правой ветви зависимости. При увеличении скорости резания создаются условия, постепенно переводящие систему резания в автономный режим взаимодействия контактных поверхностей. И, начиная со скорости V_A , процесс полностью переходит в автономный режим, т.е. не реагирует на изменение внешней среды. Причём уровень асимптоты b_1 является константой, практически не зависящей от скорости резания, обрабатываемого и инструментального материала.

В работе [2] была описана математическая модель процесса формирования шероховатости в процессе резания (рис. 1). Для её описания были использованы экспоненциальные и логистические зависимости, представляющие собой широко используемые модели. В результате получено следующее представление модели:

$$Ra(V) = \begin{cases} a_1 + \frac{a_2}{1 + \exp(-a_3 \log(V) - a_4)} \\ \text{при } V \leq V_M \\ b_1 + \frac{b_2}{1 + \exp(-b_3 \log(V) - b_4)} \\ \text{при } V \geq V_M \end{cases},$$

где a_1 и b_1 – Ra_{\min} левой и правой ветвей; a_2 и b_2 – расстояние между Ra_{\min} и Ra_{\max} в левой и правой ветвях; $a_3 = 4,394/\Delta V$ ($\Delta V = \log V_{90\%} - \log V_{10\%}$); $V_{90\%}, V_{10\%}$ – скорости, при которой достигаются 90 и 10% от $a_1 + a_2$ соответственно (определяется из анализа графика экспериментальных данных); $a_4 = \log V$, при которой достигается $Ra = 1/2(a_1 + a_2)$; b_3 – определяется аналогично a_3 , но является отрицательным; $b_4 = \log V$, при которой достигается $Ra = 1/2(b_1 + b_2)$.

Каждая из двух частей математической модели описывает процесс формирования шероховатости до скорости, при которой наблюдается максимальное её значение и после, то есть левой и правой логистики графика зависимости $Ra - V$.

Шероховатость, фиксируемая на деталях, в большинстве случаев контролируется в поперечном направлении. Данный способ нормирования шероховатости наиболее прост и удобен. Но такой способ регистрации шероховатости не может позволить нам судить о структуре получаемой поверхности, так как шероховатость фиксируется в направлении образующей не позволяет увидеть поверхность, выходящую из под задней поверхности режущего инструмента. Поэтому для изучения процессов, происходящих в зоне резания, и структуры рельефа поверхности, полученной при прохождении инструмента, потребовался переход на продольное направление результирующего движения резания V_e (продольная шероховатость). Именно продольная шероховатость находит своё отражение в поперечной шероховатости с циклом πD , внося свою составляющую в шероховатость, образованную кинематическими факторами: радиусом при вершине резца и подачей. Для исследования продольной

шероховатости было разработано специальное оснащение и инструмент, позволяющий регистрировать указанный параметр. Опыты проводились на стали 45.

В результате экспериментов были получены профилограммы продольных шероховатостей. Интересную структуру имеет микрорельеф поверхности, полученный на скорости 1,5 м/с. На рис. 2 продемонстрирован участок с данного профиля.

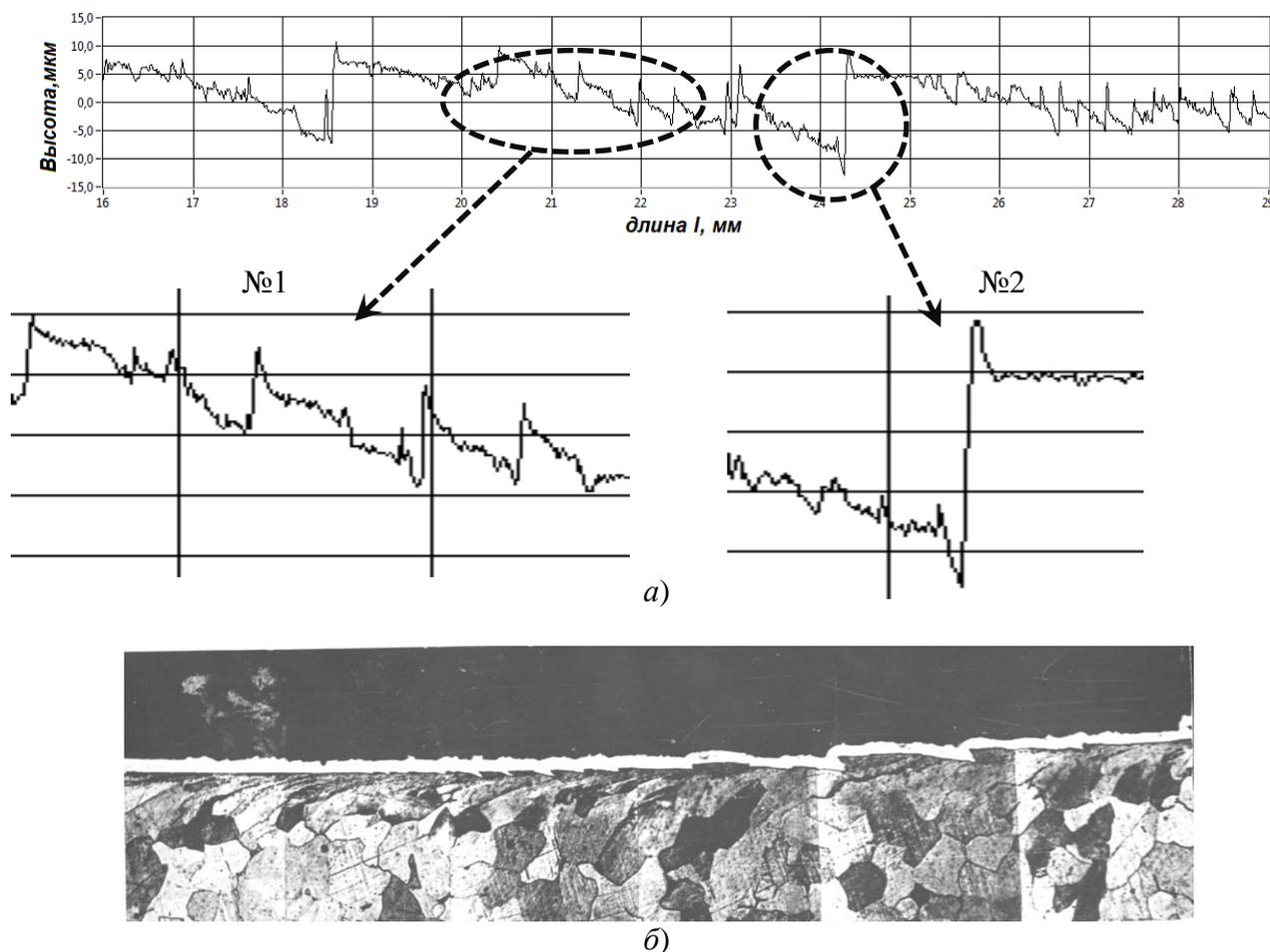


Рис. 2. Профилограммы продольных шероховатостей:

а – фрагмент микрорельефа на скорости 1,5 м/с;
б – шлиф продольной шероховатости

Как видно из профилограммы (рис. 2, *а*), на обработанной поверхности встречаются два типа повторяющихся скачкообразных участков под номерами 1 и 2. Участок №2 характеризуется резкой сменой уровня обработанной поверхности. Предположительно, данный участок профиля может возникнуть во время разрушения переходной зоны. При разрушении переходной зоны вылет режущего инструмента мгновенно уменьшается на величину этой зоны, что приводит к изменению уровня обрабатываемой поверхности.

Участок под №1 сосредоточен на убывающем уровне и не ведёт к значительному изменению высоты поверхности. Уровень изменяется по мере развития переходной зоны. Структура имеет пилообразный вид. При внимательном рассмотрении шлифа продольной шероховатости (рис. 2, *б*) можно выделить трещины, направленные под углом к поверхности. Микротрещины, получаемые в продольном направлении, в дальнейшем будут играть роль концентраторов, что может привести к последующему их разрушению.

По мере увеличения скорости резания выявленная структура поверхности исчезает и шероховатость улучшается. При скоростях выше 3 м/с поверхность состоит лишь из волнистости и высокочастотного шума. По полученным данным построены амплитудно-частотные

характеристики (АЧХ) получаемых профилей (рис. 3), из которых снижение амплитуды колебания уровня шероховатости.

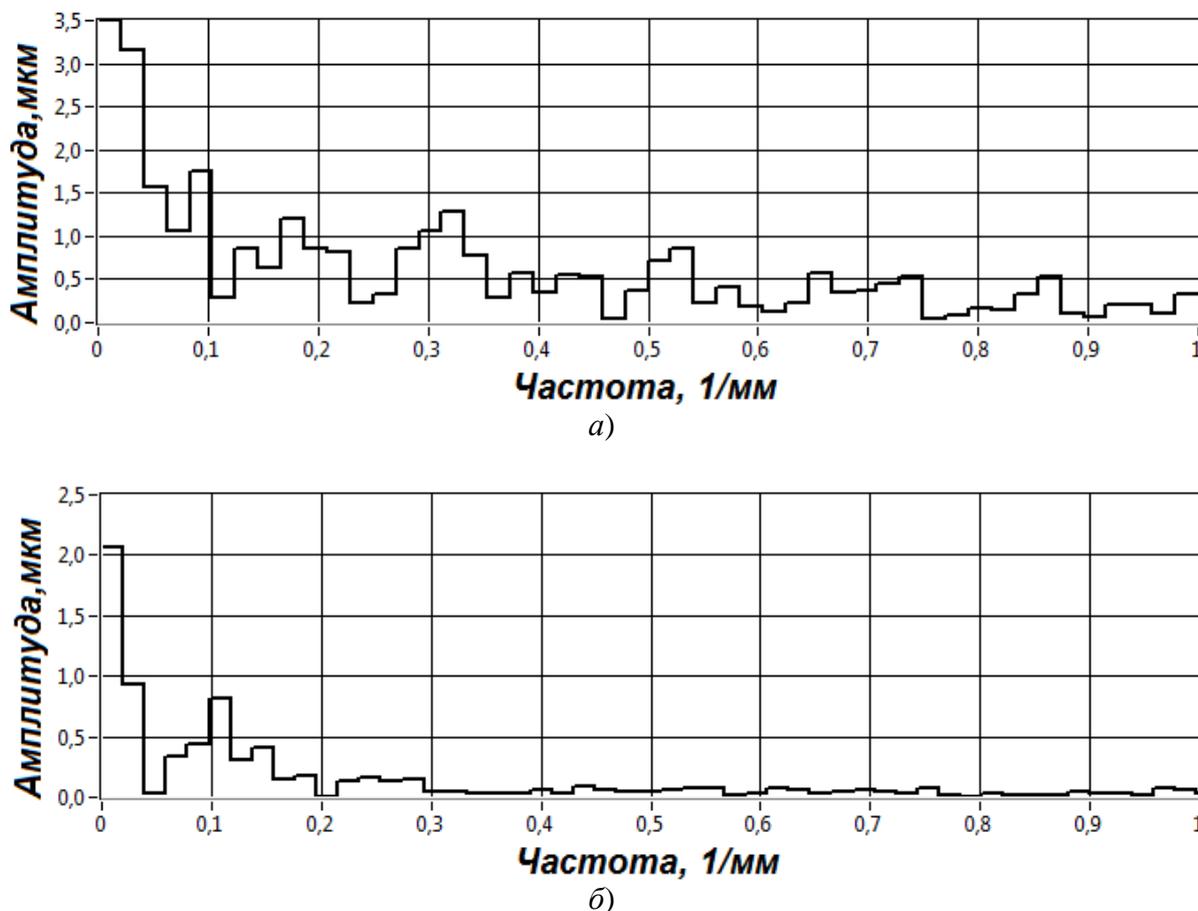


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика полученных профилей на скорости:
а – 1,5 м/с; б – 3 м/с

На приведённых АЧХ отчётливо выделяется волнистость микропрофиля в виде гармоника с высокой амплитудой и малой частотой. При скорости 1,5 м/с выделяются гармоники, образованные участками с трещинами, о которых шла речь выше. Они составляют основную часть шероховатости в продольном направлении, что напрямую влияет на величину поперечной шероховатости поверхности.

На более высоких скоростях АЧХ характеризуется только волнистостью и шероховатостью поверхности, что и получается при регистрации микрорельефа поверхности на высоких скоростях на рис. 4 отчётливо видно отсутствие трещин на скоростях больше 1,5 м/с.

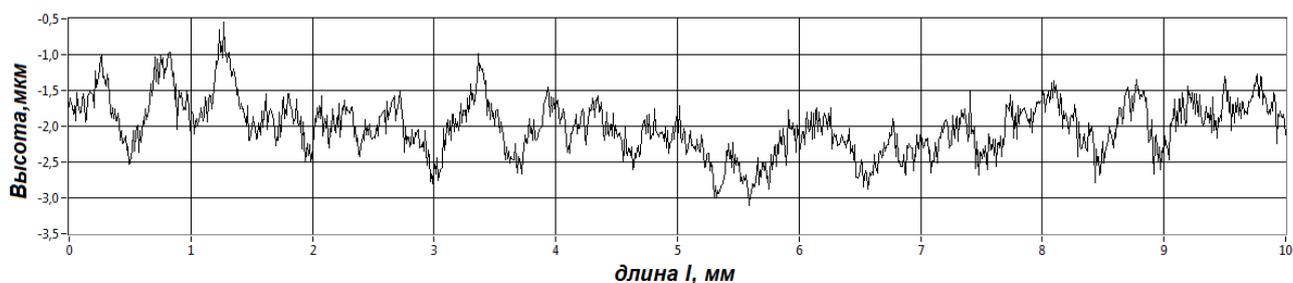


Рис. 4. Фрагмент микрорельефа на скорости 3 м/с

На скоростях больше 1,5 м/с, несмотря на малую шероховатость поверхности, значи-

тельный вклад в параметр R_a в поперечном направлении вносит волнистость продольного профиля. Возможно это и является коренной причиной недостижимости при лезвийной обработке уровня шероховатости меньше уровня b_1 на графике зависимости $R_a(V)$.

Проведены эксперименты по исследованию шероховатости на очень малой скорости (рис. 5).

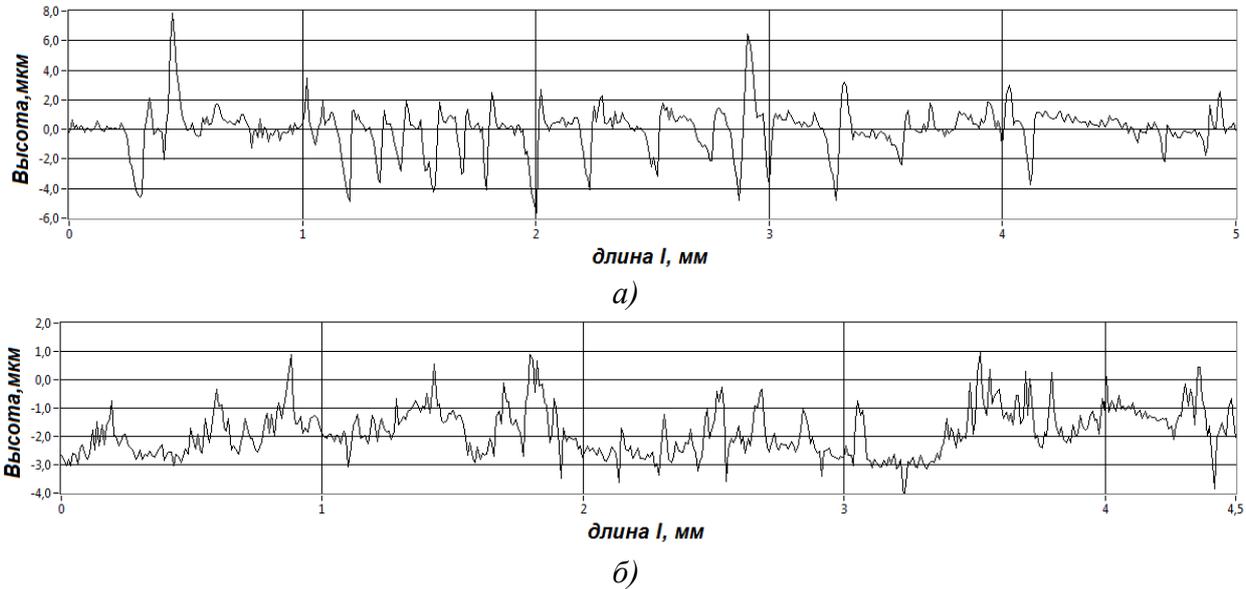


Рис. 5. Микропрофили на скорости 0,00068 м/с:
а - участок с трещинами; *б* - участок без трещин

Данный профиль является неоднородным по своей структуре. Соответственно процессы, происходящие во время формообразования, не стабильны и постоянно меняются. Предположительно, процессы формообразования на высоких и малых скоростях схожи. Разница между значениями параметра R_a при обработке на воздухе и с СОЖ при скоростях, соответствующих левой ветви зависимости $R_a - V(a_1)$, также связана с появлением на микропрофиле поверхности участков с выраженными трещинами. Есть отличительная особенность этих трещин от полученных при скорости 1,5 м/с. При таком же размахе по высоте они имеют длину в среднем в четыре раза короче.

По результатам экспериментов был построен график зависимости шероховатости от скорости резания (рис. 6), подтверждающий результаты работы [1].

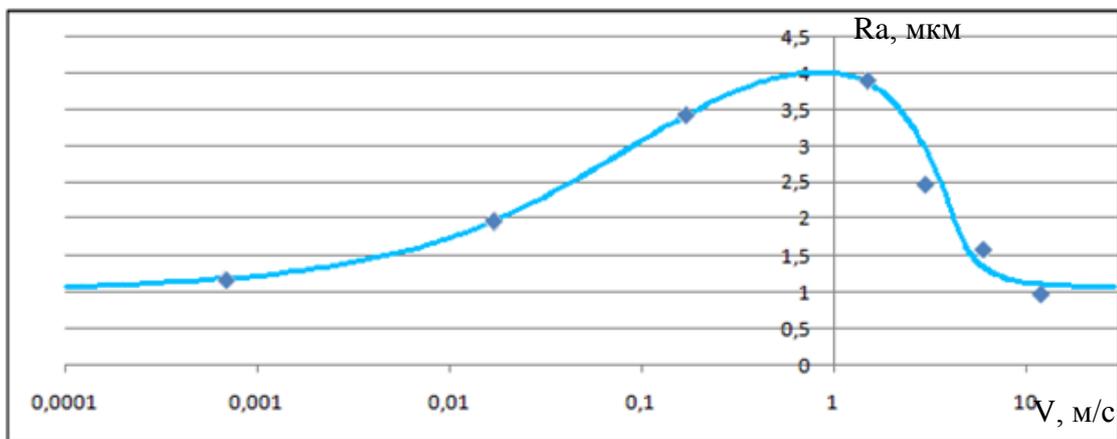


Рис. 6. График зависимости продольной шероховатости от скорости резания

Полученный график зависимости продольной шероховатости от скорости резания подобен графику зависимости поперечной шероховатости от скорости. Следовательно шероховатость поверхности детали определяется продольной шероховатостью при чистовых обработках, где случайная составляющая шероховатости вносит больший вклад, чем детерминированная, обусловленная кинематикой процесса резания.

Уровни шероховатости на правой и левой ветви зависимости имеют одинаковое значение. Они являются минимально достижимыми уровнями шероховатости при лезвийной обработке.

При исследовании проблемы плохой геометрии было обращено внимание на источники по механике разрушения контактирующих тел. Нас интересует индентирование (от англ. indentation fracture) – вдавливание индентора в менее твёрдое тело. Форма трещин, образующаяся при снятии нагрузки с индентора, изображена на рис. 7.

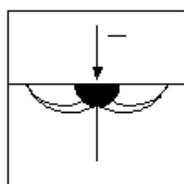


Рис. 7. Форма трещин при индентировании после снятия нагрузки

При рассмотрении шлифа продольного микропрофиля заготовки (рис. 2) чётко просматриваются микротрещины в виде пилообразной волны. Сравнивая эти микротрещины с радиальными трещинами рис. 7, образующимися при индентировании (во время снятия нагрузки), можно заметить их схожесть. Процессы, предшествующие возникновению трещин, в обоих случаях одинаковы. В обоих случаях в материале зарождается пластическая деформация. При уменьшении нагрузки напряжения меняют знаки и зарождаются радиальные трещины. После полного снятия нагрузки около деформированной зоны возникают растягивающие напряжения, которые приводят к расширенной системе боковых трещин. Можно предположить, что в обоих случаях причины, механизмы зарождения и развития трещин схожи. Несмотря на разницу твёрдости материалов, процесс происходит в условиях большого гидростатического давления, поэтому можно рассматривать процесс резания с точки зрения индентирования.

В процессе продвижения режущего клина материал выходит из-под задней поверхности и попадает в условия низкого давления, в результате чего упругодеформированный материал уже не способен существовать, сохраняя свои формы и объёмы. И напряжения, возникшие в металле, разрывают его, в результате чего появляется трещина.

В процессе продвижения режущего клина материал выходит из-под задней поверхности и попадает в условия низкого давления, в результате чего упругодеформированный материал уже не способен существовать, сохраняя свои формы и объёмы. И напряжения, возникшие в металле, разрывают его, в результате чего появляется трещина.

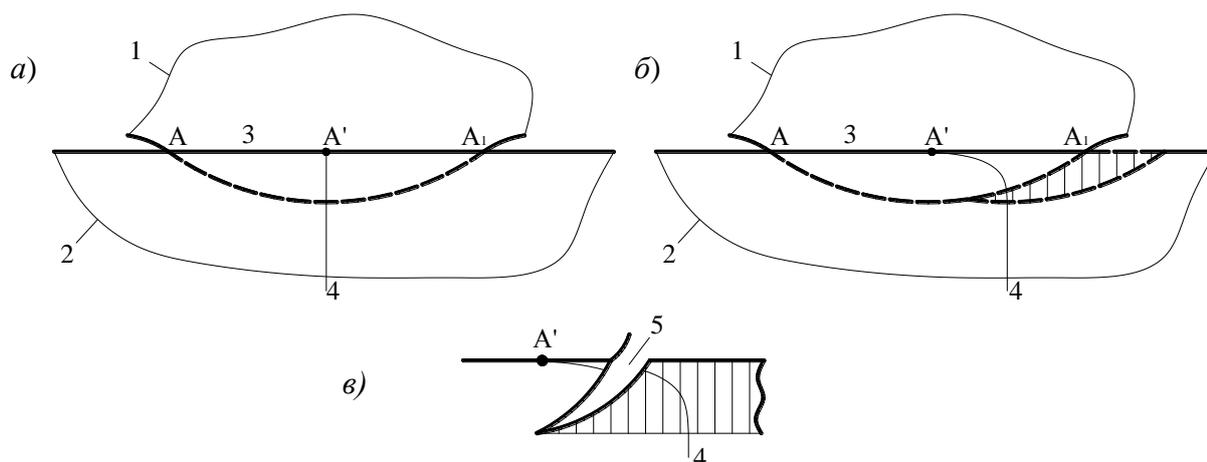


Рис. 8. Схема образования трещины

Описанная в работе [4] теория переходных зон также проливает свет на процессы, происходящие при резании. Накопление деформации в сдвиговом пятне идеального контакта однородных материалов обладает симметрией распределения между разделяемыми половинками при выполнении условия, что каждая точка контакта на главной линии сдвига перемещается в два

раза медленнее перемещения тела. Переход от сдвига между однородными телами к аналогичному сдвигу разных тел ведёт к изменению кинематики деформируемой области. Вместо симметричной линзы после скольжения возникает плоско-выпуклая линза (нарост).

Схема на рис. 8, *а* соответствует исходному моменту установления связи на площадке AA_1 между жёстким телом 1 и пластичным 2. Контакт 3 представляет главную линию скольжения. После перемещения жёсткого образца (рис. 8, *б*) на расстояние Δx точка A' границы пластического контакта перемещается на ту же величину (в два раза больше, чем при контакте одинаковых тел). Волокно, первоначально нормальное к поверхности, деформируется, изгибается по кривой 4. На шлифе 8, *г* можно наблюдать деформацию волокон в сторону движения режущего клина. Видно, как волокна растягиваются вдоль линии контакта тел. В определённый момент растягивающие усилия достигают предела прочности растягиваемых волокон, и на поверхности пластичного материала происходит образование трещины 5 (рис. 8, *в*). Дальше процесс повторяется, в результате чего поверхность покрывается микротрещинами. Наглядно видно на шлифе продольной шероховатости рис. 2, *б* последствия этого процесса. Это, безусловно, необходимо учитывать при назначении шероховатости на ответственные детали в таких отраслях как авиастроение, космонавтика и других отраслях, требующих высоких показателей надёжности и качества.

Вывод

Следует вводить дополнительные методы регламентации шероховатости. Необходимо регистрировать продольную шероховатость на поверхностях ответственных деталей, так как она находит отражение в поперечной шероховатости. Поперечная шероховатость не может дать информации о структуре поверхности, в частности, о наличии трещин, оставшихся после лезвийной обработки.

Библиографический список

1. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / под ред. С.Г. Энтелеса, Э.М. Берлинера. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
2. Улитина А.В. Моделирование процесса формирования шероховатости при обработке металлов резанием: дисс. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород: НГТУ, 2004. – 94 с.
3. Макушок, Е.М. Массоперенос в процессах трения / Е.М. Макушок, Т.В. Калиновская, А.В. Белый. – Мн.: Наука и техника, 1978. – 272 с.

*Дата поступления
в редакцию 04.12.2013*

V.M. Tikhonov, E.A. Utkin

PROCESSES OF FORMING SURFACE LAYERS OF MACHINE PARTS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Investigation of the influence of cutting processes on the quality of the products. Rationing longitudinal roughness details on the results of research.

Methodology: To register, surface topography, roughness profiler used. Recorded digital signal processed through software Labview 7. Held amplitude frequency analysis.

Findings: Proposed registration and valuation longitudinal roughness for critical parts for the purpose of registering the resulting surface structure.

Key words: cutting of metals, the longitudinal roughness, crack, transition zone, indentation, the amplitude-frequency characteristic (AFC).