

УДК 532.525.6:539.538

КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКОГО ПОКРЫТИЯ ВОДНО-КАПЕЛЬНОЙ СТРУЕЙ

Ставров В. П., Ставров В. В., Столяров А. И., Ткачев В. М.

*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск
Гомельский государственный технический университет им. С.О.Сухого, г.Гомель
Республика Беларусь.
vpstavrov@user.unibel.by*

Введение. Обработку водно-капельной струей применяют как экологически чистый способ удаления полимерных и иных покрытий с поверхностей крупногабаритных изделий [1–4]. Несмотря на широкое распространение водоструйной технологии и большое число публикаций по результатам ее исследования механизмы повреждения покрытий и кинетика разрушения изучены недостаточно. Известные методы расчета параметров повреждения при ударе даже единичных капель воды о поверхность покрытия требуют значительных затрат машинного времени. Водно-капельная струя и возникающий при ее воздействии на покрытие процесс изнашивания имеют стохастическую природу, учет которой неизбежно приводит к увеличению объема вычислений. Назначение режимов обработки на основе чисто эмпирических подходов имеет очевидный недостаток – ограниченные возможности переноса результатов на другие материалы и параметры процесса. Цель данного исследования – установление между параметрами капель и свойствами покрытия, с одной стороны, и параметрами износа покрытия – с другой, количественных соотношений, пригодных для практических расчетов интенсивности изнашивания и управления процессом обработки.

Модель. Исследуемая схема удаления покрытия водно-капельной струей показана на рис. 1. Основные контролируемые параметры процесса: давление воды на входе в сопло p_0 , диаметр сопла d_0 , расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности L_0 , скорость перемещения сопла относительно поверхности v . Для удаления хрупких покрытий водно-капельной струей типичны значения $p_0 = 50\text{--}200$ МПа, $d_0 = 0,2\text{--}1,0$ мм [1–4]. Расстояние L_0 и скорость v подбирают из условий максимальной производительности и чистоты очистки поверхности.

На некотором расстоянии от сопла струя распадается на стохастическую систему капель. Распределение капель по координатам в сечении струи, а также по скоростям и размерам зависит от конструкции сопла и параметров процесса. В данной работе исследовали плоскую водно-капельную струю прямоугольного сечения с размерами сечения вблизи обрабатываемой поверхности B и b (см. рис. 1). Ширина плоской струи B увеличивается пропорционально расстоянию L , а поперечный размер b считается постоянным [3, 4]. Для плоской струи типично распределение капель по сечению, близкое к равномерному. Закон и параметры распределения капель по координатам могут быть в каждом случае уточнены по следу на удаляемом покрытии [5, 6] и соответствующим образом учтены в модели.

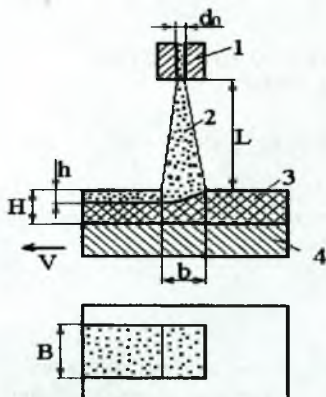


Рис. 1. Схема удаления покрытия водно-капельной струей.
1 – сопло; 2 – струя; 3 – покрытие; 4 – подложка.

Согласно экспериментальным данным [3, 5], диаметры капель в исследованном диапазоне скоростей истечения и расстояний от сопла параметры распределения имеют близкие значения, причем как для круглой, так и для плоской струи. На основании этого в дальнейших расчетах распределение диаметров капель в струе принимали согласно закону Розина-Раммлера (Вейбулла) со средним значением $d_m = 60$ мкм и коэффициентом вариации 1,1 [5]. Реализации диаметров капель и других величин, зависящих от диаметра капле, генерировали в стандартном пакете Mathcad. При этом полагали, что диаметр капле не более диаметра сопла (0,5 мм). Число капле в выборке задавали по расходу воды через сопло при заданном давлении на входе. Считали, что скорость u ; капле i в момент удара зависит от ее диаметра d_i , от давления воды на входе в сопло p_0 и от расстояния между соплом и обрабатываемой поверхностью L [6]:

$$u = k_u \sqrt{\frac{2 p_0}{\rho_w}} \cdot \exp \left[- \frac{3 c_z \rho_a L}{4 \rho_w d} \right], \quad (1)$$

где k_u – коэффициент, учитывающий сопротивление сопла; ρ_w – плотность воды; ρ_a – плотность воздуха; c_z – коэффициент сопротивления.

Распределение скоростей капле, вытекающее из соотношения (1), хорошо согласуется с экспериментальными данными [5] при $c_z = 0,15-0,25$. Это свидетельствует о том, что форма капле отличается от сферической. Удлиненную форму капле учитывали в дальнейшем при оценке эффективного числа капле, воздействующих на поверхность покрытия при заданном расходе воды.

Давление, возникающее на поверхности при нормальном ударе единичной капле, рассчитывали по приближенным формулам, выведенным на основе анализа распространения ударных волн в капле [7]. Точность приближенного решения и влияние на распределение давления наклона поверхности (до 45° к нормали) и прослойки воды (до 0,5 диаметра капле) проверяли, решая задачу об ударе капле воды по методу "particle in a cell" [8]. Толщину прослойки воды на обрабатываемой поверхности оценивали как отношение суммарного объема капле, падающих на расчетный участок размером $b \times B$ к периметру участка, умноженному на среднюю скорость капле в момент удара о поверхность покрытия.

В качестве модельного материала покрытия выбран полиметилметакрилат (ПММА), для повреждений которого при воздействии водно-капельной струи имелись наиболее полные экспериментальные данные [3, 9]. Модуль упругости и характеристики прочности при ударе задавали на основе результатов эксперимента [9]. С учетом этих данных приняты следующие характеристики свойств материала покрытия: плотность $\rho = 1180$ кг/м³, модуль Юнга $E = 9$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,32$, скорость звука $c = 2760$ м/с, предельная деформация при разрушении $\epsilon^* = 0,02$, прочность

связи покрытия с подложкой при отрыве $\sigma^* = 20$ МПа, прочность связи при сдвиге $\tau^* = 10$ МПа [10].

Напряженное и деформированное состояние и поврежденность материалов при ударе каплей нормально к поверхности рассчитывали по методу конечных элементов, решая динамическую осесимметричную задачу для модели в виде цилиндра диаметром не менее 40 диаметров капли и высотой до 5 мм. Элемент покрытия считали разрушенным данной каплей и удаленным, если наибольшие главные удлинения в этом элементе хотя бы в один из моментов времени распространения ударной волны после удара превышают указанное выше предельное значение ϵ^* . Отслоение покрытия оценивали по превышению нормальными и касательными напряжениями в элементах покрытия, прилегающих к подложке, соответствующих предельных значений σ^* или τ^* . По координатам разрушенных элементов вычисляли глубину и диаметр поврежденной области покрытия и находили зависимость этих размеров от диаметра и скорости капли. Эту область аппроксимировали сферическим сегментом с расчетными значениями диаметра d^* и высоты h^* . Диаметр d^* по данным расчетов представляли в виде функции:

$$d^*/d = k'(u - u'). \quad (2)$$

Здесь k' – коэффициент, зависящий от механических свойств материала покрытия; u' – пороговое значение скорости, начиная с которого появляются повреждения ($d^* = 0$ при $u < u'$). Согласно расчетам [6] для ПММА $k' = 0,002$ с/м; $u' = 67$ м/с, $h^* = (0,20-0,25)d^*$.

Как следует из предварительных результатов расчета, отслоение и отрыв покрытия возможны только при ударе каплей, диаметр которых больше толщины покрытия, а прочность связи покрытия с подложкой меньше, чем когезионная прочность покрытия (меньше указанных выше значений). В случае прочной связи покрытия с подложкой такого рода повреждения могут возникать только при более высоких скоростях каплей, чем местные повреждения, задаваемые формулой (2). По этим причинам отрыв и отслоение покрытия в дальнейших расчетах не учитывались.

Стохастический процесс воздействия на покрытие водно-капельной струи моделировали, генерируя распределение каплей по размерам, скоростям и координатам (на участке $b \times b$) для плоской струи с параметрами, соответствующими экспериментальным данным [3]: диаметр сопла 1 мм, давление от 40 до 110 МПа, расстояние от сопла до покрытия 35 мм, скорость перемещения сопла относительно покрытия 125–1500 м/мин. Число каплей, действующих на участок, рассчитывали по значению расхода воды через сопло и скорости перемещения сопла относительно обрабатываемой поверхности. При расчетах повреждений покрытия учитывали действие на участок $b \times b$ до 10^7 каплей.

Область покрытия, в которой при ударе каждой единичной капли нарушается условие прочности, считали поврежденной и удаляемой. При ударе каждой следующей капли учитывали глубину и геометрию повреждений, вызванных предыдущими каплями. Взаимное влияние одновременных и последовательных ударов каплей на размеры вызываемых ими повреждений невелико [11], поэтому повреждения от отдельных каплей считали независимыми. Не учитывали также возможность откалывания участков покрытия в виде раковин, размеры которых значительно превышают размеры каплей, из-за отсутствия достаточных экспериментальных данных об условиях и механизме таких повреждений.

В результате суммирования повреждений участка покрытия, подвергнутого воздействию водно-капельной струи, получали профиль обработанной поверхности как реализацию случайного поля $\zeta(x, y)$. Строили гистограммы и подбирали подходящую одномерную функцию распределения $F_\zeta(z) = P(\zeta < z)$ случайного поля $\zeta(x, y)$. Оценивали среднее значение толщины удаленного покрытия (глубины профиля) $\bar{z}(x, y) =$

$\langle \zeta(x, y) \rangle$, среднее квадратическое отклонение $s_\zeta = \langle (\zeta - \bar{z})^2 \rangle^{0.5}$, нормированную корреляционную функцию, другие статистические характеристики, в т.ч. стандартные параметры шероховатости поверхности $\zeta(x, y)$ – среднее арифметическое отклонение профиля Ra , среднее квадратическое отклонение Rq , средний шаг неровностей профиля по средней линии Sm . По приращениям значений $\zeta(x, y)$ в близлежащих точках оценивали угол наклона участков поврежденной поверхности к отношению к плоскости $z(x, y) = 0$.

Среднюю скорость эрозии покрытия под действием водно-капельной струи как функцию параметров рассчитывали по скорости изменения $z(x, y, t)$ среднего значения случайного поля $\zeta(x, y)$ как функции времени действия струи на участок покрытия. Кроме того, по аналогии с интенсивностью изнашивания в трибологии [12] ввели интенсивность повреждения покрытия водно-капельной струей как отношение объема удаленного материала покрытия V^* к суммарному объему капель V_0 , действовавших на данный участок покрытия: $I = V^*/V_0$. Данная безразмерная величина характеризует эффективность различных режимов воздействия водно-капельной струей.

Параметры воздействия должны быть достаточными для полной очистки поверхности от покрытия заданной толщины и обеспечивать минимальное воздействие струи на подложку. Вследствие статистической неоднородности потока и шероховатости обрабатываемой поверхности неизбежно неравномерное удаление покрытия, а следовательно, неравномерное воздействие струи на подложку. Продолжительность воздействия водно-капельной струи на очищенную от покрытия поверхность подложки зависит от распределения случайного поля $\zeta(x, y)$ и скоростей изменения толщины остающегося на подложке слоя на конечных стадиях очистки $\zeta'(x, y)$: $\tau = \zeta/\zeta'$. Используя законы распределения случайного поля $\zeta(x, y)$ и местных скоростей удаления покрытия $\zeta'(x, y)$, строили закон распределения продолжительности воздействия водно-капельной струи на подложку, определяли условия полного удаления покрытия с учетом неоднородности струи и неравномерности повреждений отдельных участков.

Результаты расчета и их обсуждение. При ударе капли воды нормально к жесткой поверхности в центральной части области контакта капли с поверхностью давление распределено почти равномерно и практически совпадает с т.н. ударным давлением Жуковского $p_w = \rho_w u + c_w$ (здесь c_w – скорость распространения звука в воде). На периферии участка контакта давление имеет пиковую составляющую, в которой давление примерно в 2,5 раза больше ударного [7]. Через малый промежуток времени t_c после касания капли кольцевая область пикового давления исчезает. Оно практически отсутствует уже при радиусе контактной площадки $\cong 0.5$ от радиуса капли.

При ударе по наклонной поверхности уровень пикового давления монотонно снижается по мере увеличения угла наклона (примерно до $2 p_w$ при угле 45°), одновременно уменьшается и радиус контактной площадки (до $0,30-0,35$ радиуса капли). На распределение давления при ударе единичной капли более существенно влияет водная прослойка. С увеличением толщины прослойки до $0,10-0,15$ радиуса капли почти до $5 p_w$ возрастает давление в центральной части контактной площадки, т.е. наблюдается кумулятивный эффект. При дальнейшем увеличении толщины водной прослойки давление в центре площадки снижается. При этом давление на периферии контактной площадки остается практически неизменным по крайней мере до значений толщины прослойки, равных радиусу капли.

Расчет повреждений покрытия стохастическим ансамблем капель при принятых выше гипотезах дает линейную зависимость средней глубины повреждения от объема и соответственно числа капель. С увеличением давления воды на входе в сопло, а следовательно и скорости капель, интенсивность повреждений линейно возрастает (рис. 2, а). В то же время значения интенсивности повреждений, вычисленные в результате ли-

нейного суммирования повреждений от отдельных капель, оказались в 12–15 раз больше, чем в эксперименте [3]. Они не зависят от скорости перемещения сопла относительно обрабатываемой поверхности v , тогда как согласно эксперименту [2] при возрастании скорости v интенсивность повреждения увеличивается.

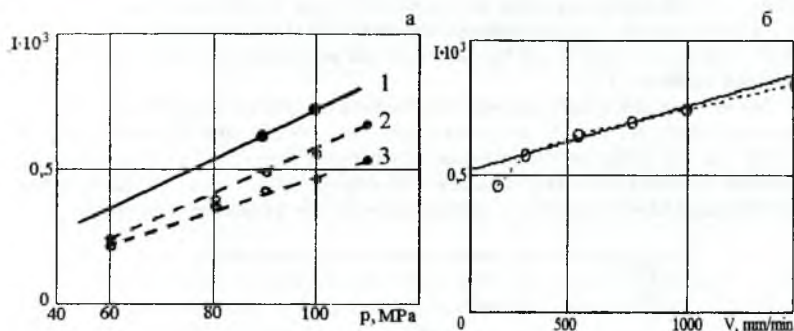


Рис. 2. Зависимость интенсивности повреждения ПММА от давления при скорости перемещения сопла (а): 1 – 1000, 2 – 250, 3 – 125 мм/мин и от скорости перемещения сопла при давления 100 МПа (б). Линии – расчет; точки – эксперимент [3].

Наиболее вероятной причиной выявленного несоответствия гипотезы линейного суммирования повреждений результатам эксперимента может служить форма капель. Рассчитанное по результатам измерения скоростей капель значение коэффициента сопротивления $c_z = 0,15–0,25$ намного меньше, чем для капель сферической формы. Это означает, что капли, скорее всего, имеют форму цилиндрических микроструек, а следовательно, их число в единице объема вытекающей из сопла воды меньше, чем число сферических капель. Введение поправочного коэффициента, характеризующего относительную длину капель и соответствующего завышенным значениям коэффициента

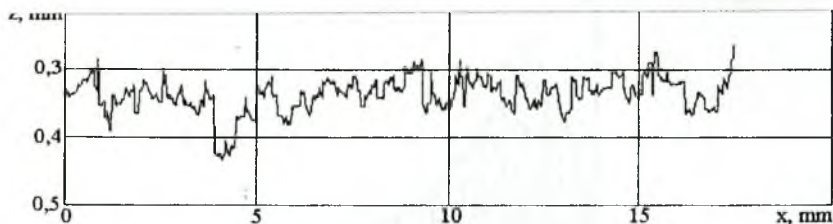


Рис. 3. Типичный профиль поврежденной поверхности (расчет).

Профиль поверхность покрытия, построенной в результате суммирования повреждений, возникших в результате действия стохастического ансамбля капель, получается неровным, аналогично профилю шероховатой поверхности (рис. 3).

Одномерное распределение глубины повреждений – случайного поля $\zeta(x, y)$ – близко к нормальному (рис. 4), однако имеет значимые положительные асимметрию и эксцесс. С увеличением давления воды в сопле в исследованном диапазоне асимметрия распределения уменьшается, а эксцесс, напротив, увеличивается.

Среднее арифметическое отклонений профиля Ra имеет значения 13–18 мкм, близкие к измеренным на образцах из ПММА, обработанных при тех же параметрах струи [3, 13]. Закон распределения параметра Ra на отдельных участках близок к нормальному. С увеличением давления воды возрастают как средние значения Ra на участках, так и их разброс. Средние значения параметра Rq (18–25 мкм) находятся в соответствии со средними значениями Ra , типичном для шероховатости с нормальным распределением профиля [12].

Значения среднего шага неровностей профиля по средней линии S_m распределены по закону Вейбулла (рис. 5), их средние значения (170–250 мкм) близки к измеренным [13]. Как и в эксперименте, наблюдается некоторое различие значений параметра, измененных в направлении перемещения и по ширине следа струи. С увеличением средней скорости капель возрастают средние значения S_m и показатели разброса.

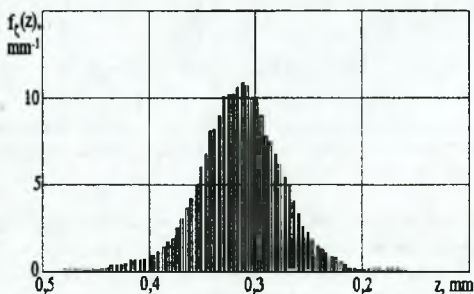


Рис. 4. Гистограмма распределение глубины шероховатого профиля поверхности.

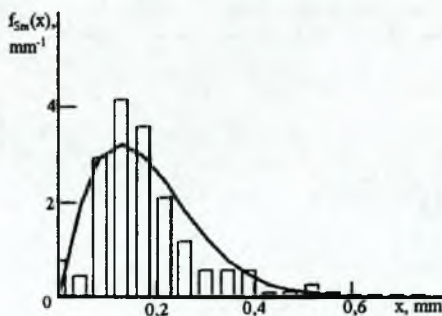


Рис. 5. Распределение среднего шага неровностей модельного профиля.

Угол наклона участков шероховатой поверхности к плоскости $z(x, y) = 0$ распределен по закону Вейбулла с коэффициентом вариации 1,7. Среднее значение независимо от режимов обработки составляет около 14° , что с учетом влияния угла наклона

площадки на распределение давления при ударе капли дает основания для пренебрежения этим фактором.

Следует обратить внимание, что средние значения шага неровностей профиля значительно превышают средние размеры локальных повреждений, заданных формулой (2). Это указывает на связь параметров шероховатости обрабатываемой поверхности не только с параметрами отдельных капель, но и со стохастической природой водно-капельной струи. Данный вывод подтверждается и анализом корреляционных функций случайного поля $\zeta(x, y)$. Эффективный радиус корреляции значений $\zeta(x, y)$ существенно больше не только типичного размера локального повреждения от отдельной капли, но и среднего значения параметра Sm . Такая особенность корреляционной функции случайного поля шероховатости, возникающей в результате обработки ПММА водно-капельной струей, отмечается и при экспериментальном построении по различным методам [13].

По функции распределения толщины удаленного слоя за время t могут быть вычислены параметры, необходимые для управления водно-капельной струей. Пусть h – толщина покрытия, тогда $F_{\zeta}(h) = P[\zeta(t) < h]$ – средняя доля площади участка, очищенного за время t , или вероятность удаления покрытия в заданной точке за время t (рис. 6). Усеченная функция $F_{\zeta}[z(t)]$ при $z(t) < h$ задает распределение толщины покрытия, остающегося на подложке. Распределение продолжительности воздействия струи на подложку после удаления покрытия (при заданных режимах), рассчитанная по значениям этой функции, показана на рис. 7.

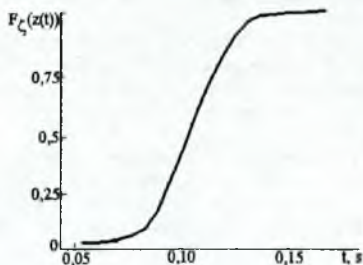


Рис. 6. Вероятность удаления покрытия как функция продолжительности воздействия.

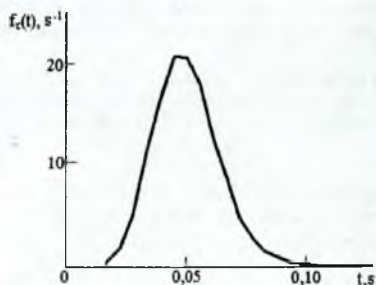


Рис. 7. Распределение продолжительности воздействия струи на подложку.

Продолжительность воздействия, гарантирующая полную очистку подложки от покрытия (при этом $P[\zeta(t) < h] \cong 1$), существенно зависит от параметров шероховатости обрабатываемой поверхности. С другой стороны, как следует из расчетов, шероховатость обрабатываемой поверхности и неоднородность струи обуславливают существенное различие промежутков времени τ , в течение которого водно-капельная струя действует на участки подложки, уже очищенные от покрытия. Эти участки подложки могут быть повреждены, что и наблюдали в эксперименте [3, 4].

Таким образом, на основе предложенной статистической модели установлена взаимосвязь повреждений хрупкого покрытия с параметрами водно-капельной струей высокого давления и получены количественные характеристики. Результаты исследования могут быть использованы с целью управления процессом удаления хрупких покрытий водно-капельной струей и оптимизации параметров воздействия.

Исследования выполнены в рамках проекта INTAS00-0258.

Список литературы

1. Louis H., Schikorr W. Fundamental aspects in cleaning with high speed water jets/ Proc. Int. Symp. Jet Cutting Technology. – Guilford, 1982, pp. 217–228
2. Meng P. Experimental and analytical investigation on the cleaning process. – Ph.D. Diss. – New Jersey Institute of Technology, 1996. – 143 p.
3. Milchers W. Abtragen von Polymeren mit dem reinen Wasserstrahl. – Diss.D.-Ing. – Universitaet Hannover, 2001. – 128 S.
4. Louis, H., von Rad, Ch., Schenk, A., Decoating with water jets/ Проблемы создания ресурсосберегающих технологий: Материалы конф. – Тула, 2002, с. 249–254.
5. Луис Х., фон Рад К., ван Белл М., Шенк А., Ставров В.П., Ставров В.В. Характеристика водно-капельной струи для удаления хрупких покрытий. 1. Эксперимент //Трение и износ, т. 23, № 6, 2002, с. 640–644.
6. Луис Х., Ставров В.П., Ставров В.В. Характеристика водно-капельной струи для удаления хрупких покрытий. 2. Модель // Трение и износ, т. 24, № 1, 2003, с. 49–53.
7. Ставров В.П., Луис Х., Ставров В.В. Оценка повреждения хрупкого материала при ударе капли воды // Актуальные проблемы динамики и прочности в теоретической и прикладной механике. – Мн.: УП «Технопринт», 2001, с. 415–419.
8. Potter D. Methods in Computational Physics. – 1972.
9. Дорожко А.В., Свириденко А.И., Ставров В.П., Столяров А.И., Ткачев В.М. Деформации и разрушение ПММА при высокоскоростном ударном нагружении //Материалы, технологии, инструменты, т. 8, № 3, 2003, с. 7–9.
10. Сечко А.Э. Адгезионные исследования системы органическое стекло-клей-сталь/Проблемы создания ресурсосберегающих технологий: Материалы конф. –Тула, 2002, с. 332–335.
11. Луис Х., Ставров В.П., Ставров В.В., Зюдмерзен У., Шеер К., Шенк А. Распределение ударных импульсов на поверхности, обрабатываемой водно-капельной струей. //Инженерно-физический журнал, т. 77, № 2, 2004, с.45–50.
12. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трибология. Принципы и приложения. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
13. Свириденко А.И., Игнатовский М.И., Свекло И.Ф., Луис Х., Ставров В.П. Исследование микро- и наногометрии поверхности полиметилметакрилата, обработанной водно-капельной струей //Трение и износ, т. 24, № 2, 2003, с. 186–191.