



УДК 621.7.02

DOI: 10.30987/article_5d2df088226b87.55001583

В.Е. Иноземцев, к.т.н.

(Федеральное государственное автономное учреждение науки
Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук,
127055, Россия, г. Москва, Вадковский пер., дом 18, стр.1А)

E-mail: vitalin-85@mail.ru

Оценка воздействия управляемых входных критериев на качественные характеристики формируемой поверхности деталей

Приведены различные факторы, воздействующие на протекание процесса формообразования при комбинированной обработке. Рассмотрена роль этих факторов и значимость их совокупного воздействия на рельеф поверхности, проводится анализ степени их влияния. Даны рекомендации по выбору режимов для комбинированной обработки легкоплавких металлов.

Ключевые слова: шероховатость; СОТС; комбинированная обработка; параметры; материал; режимы; силы резания.

V.E. Inozemtsev, Can. Sc. Tech.

(Federal State Autonomous Institution of Science, Institute of Design-Technological Informatics of Russian Academy of Sciences, Building 1A, 18. Vadkovsky Alleyway, Moscow, Russia, 127055)

Assessment of controlled input criteria impact upon quality characteristics of parts surface formed

Various factors affecting shaping processes at combined processing are shown. A role of these factors and a significance of their total impact upon a surface relief is considered, the analysis of their impact is shown. The recommendations on the mode choice for fusible metal combined processing are given.

Keywords: roughness; SOTS; combined processing; parameters; material; modes; cutting forces.

С развитием технологий в обрабатывающей промышленности существенно меняются тенденции в отношении как моделирования и построения процесса формообразования поверхности, так и расширения количества факторов управления процессом получения формы поверхности, её качества и обеспечения в ряде случаев специальных параметров поверхности деталей. Применение нового высокоточного и многофункционального обрабатывающего оборудования, высокоточных измерительных приборов и наличие широкого спектра программных вычислительных пакетов позволяет построить наиболее оптимальный процесс формообразования поверхности из разных материалов, учитывая при этом большое количе-

ство специфических факторов, действующих в совокупности на выбранный путь реализации формирования детали.

При этом учёт наибольшего количества входящих факторов и обработку степени их влияния на уровне моделирования процессов позволяет существенно сократить время на подготовительный этап производства, снизить затраты на материалы, их расход, оптимизировать технологический процесс производства и контроля деталей. Это в целом позволяет значительно сократить сроки окупаемости производства при такой организации и быстрее реагировать на изменяющиеся требования рынка машиностроительной продукции по сравнению с традиционно применяющимися

оборудованием и корректировками технологических процессов опытно-экспериментальным путём. Таким образом, возникает необходимость совершенствовать технологию производства, применяя новые материалы с более выраженными свойствами, снижать вес деталей, совершенствовать характеристики производимой продукции с неизбежно повышающимися требованиями точности и контроля.

Для обеспечения высокого качества продукции важно понимать и учитывать максимальное количество факторов, влияющих на точность и качество формообразования при изготовлении деталей.

Рассматривая действующие на процесс формообразования факторы, необходимо учитывать метод получения детали. С существенным различием сказывается комплексное воздействие управляемых факторов при формировании деталей методом вычитания материала (классическая механическая обработка) и методом сложения материала (применяющаяся в настоящее время технология выращивания деталей). Как правило, после любого метода обработки требуется проведение операций по достижению окончательных параметров поверхностей деталей (чистовая или финишная обработка), что может осуществляться или механическим воздействием на поверхность, или электрохимическим или комбинацией нескольких способов обработки.

Одним из перечня важных факторов является обрабатываемость материала – свойство материалов подвергаться механообработке [1 – 4]. Показателями обрабатываемости материала являются:

- сила резания материала, зависящая от момента вращения (обычно сравнивается с эталоном – силой резания стали 45), определяется измерением при аналогичных режимах резания);

- склонность к наростообразованию на передней поверхности режущего инструмента (определяется, как правило, при равных условиях резания). Если у материала имеется склонность к наростообразованию, что характерно для легкоплавких металлов, то необходимо учитывать и форму нароста, что имеет значение при выборе инструмента;

- значение эффективной мощности, требуемой для механообработки, которая сравнивается с эффективной мощностью для обработки материала-эталона;

- пластическая деформация (степень усадки стружки) материала, которая сопровождает

процесс формообразования поверхности детали (учитывается измерением и рассматривается как продольная, так и поперечная усадка);

- теплота, образующаяся при образовании стружки, т.е. деформационные процессы в приповерхностных слоях, вызванные работой режущей кромки инструмента. Необходимо учитывать характер неравномерности распределения образующейся теплоты между обрабатываемой поверхностью, режущей кромкой инструмента и стружкой;

- шероховатость поверхности;

- остаточные внутренние напряжения, возникающие из-за разного характера и степени деформации в разных точках приповерхностных слоёв из-за разности температурных полей или в результате наступивших пластических деформаций материала;

- разность скорости изнашивания материала инструмента в отличие от скорости его изнашивания при резании материала-эталона;

- форма, вид, размеры стружки (от этого зависит возможность ее быстрого удаления из зоны обработки, компактного складирования и дальнейшей транспортировки, условия безопасности труда оператора станка);

- потребление энергии при получении единицы массы стружки;

- свойства обрабатываемого материала (химический состав, структура, твёрдость, предел прочности и относительного удлинения, коэффициент трения в паре с инструментальным материалом, теплопроводность, электропроводность).

Важно также учитывать, что на практике свойства материалов из-за отклонений в химическом составе и неоднородности структуры в некоторой степени меняются, что не позволяет их считать в теории абсолютно постоянными. Также, рассматривая процессы механообработки и их характеристики, надо учитывать и комплексное сложное взаимодействие всех физико-химических и тепловых явлений в зоне резания, которое непостоянно и носит изменяющийся характер из-за различных изменений режимов резания, постоянного изменения геометрии режущего инструмента вследствие его изнашивания, колебания температурных полей в зоне резания, наличия и вида применяемых смазочно-охлаждающих сред (СОТС) и т.п.

Таким образом, при анализе статистических данных по входным критериям влияния на результат формообразования, только при учёте факторов механической обработки, проведение сравнения количествен-

ных оценок обрабатываемости по стойкости инструмента может быть допустимым при обеспечении одинаковых условий обработки резанием для рассматриваемых групп обрабатываемых и инструментальных материалов.

Также необходимо учитывать наличие применения СОТС и их физико-химические свойства (учитывая тип подачи в зону резания), что существенно влияет на протекание процесса резания; процесс отвода тепла из зоны резания; образование деформаций и остаточных напряжений в приповерхностных слоях; изменение сил резания; триботехнические процессы взаимодействия пары трения инструмент–заготовка и т.д.;

Также существенную роль на качество поверхности оказывают и режимы обработки, выбираемые с учётом обрабатываемости материала, наличия СОТС, материала режущего инструмента, его геометрии. Хотя установлено [6], что нет тесной связи между режимами обработки и шероховатостью получаемой поверхности, очевидно, что связь имеется через подачу инструмента, глубину резания, количество проходов инструмента, так как это оказывает прямое воздействие на формирование упрочнённого слоя со структурными термическими и физическими деформационными изменениями.

Кроме этого, при механообработке большую роль играет жёсткость технологической системы (способность технологической системы оказывать сопротивление деформирующим её силам при резании материалов), которая оказывает влияние на значение погрешности формы при механообработке. Таким образом, необходимо использовать оборудование, приспособления и инструменты, не имеющие серьёзных дефектов, оказывающих влияние на выполнение работ и операций в соответствии с их функциональным назначением, не имеющих корпусных деформаций, износа направляющих, подшипников, винтового привода, контактных поверхностей и обеспечивающие надёжность закрепления заготовки с минимальной погрешностью базирования.

К технологическим методам обработки поверхностей деталей с целью снижения их шероховатости и обеспечения сохранения первоначального состояния структур металла в приповерхностных слоях относят способы электрофизической и электрохимической обработки. В частности электроэрозионная обработка позволяет получать высокую точность за счёт изготовления точного профиля электрода-инструмента, корректировки положения

инструмента с учётом его изнашивания из-за эрозионных процессов, сопровождающих процесс формообразования. Именно поэтому электрод-инструмент изготавливается на 1 – 2 качества точнее, чем требования к поверхности детали.

Электроэрозионная обработка позволяет достигать качества поверхности с шероховатостью $Ra = 0,2 \dots 0,3$ мкм при обработке твёрдых сплавов на электроискровом режиме; после обработки сталей $Ra = 0,3 \dots 0,6$ мкм; при обработке шлифованием в жидкой среде $Ra = 0,5 \dots 0,8$ мкм. При этом максимальная глубина изменённого слоя металла составляет 0,4 мм, что наблюдается при черновой обработке на электроимпульсном режиме.

Однако электроэрозионная обработка сопровождается образованием на поверхности микротрещин при глубине изменённого слоя от 0,1 мм и более, поэтому, в целях снижения толщины изменённого слоя, целесообразно применять предварительный подогрев заготовки, что в свою очередь требует усложнения конструкции обрабатываемого оборудования и приводит к усложнению его эксплуатации [7].

Применение электрохимической обработки позволяет варьировать режимами процесса гораздо больше, чем при электроэрозионной, что позволяет управлять качеством поверхности в более широком диапазоне, так как шероховатость поверхности зависит от структуры материала, состава, температуры и скорости прокачки электролита, а также электрических параметров режима обработки. Эти факторы постоянно меняются, поэтому в разных точках поверхности анодное растворение протекает с разным характером интенсивности.

Характер микронеровностей при электрохимической обработке выражается межкристаллитным растравливанием, так как зёрна металла имеют меньшую растворимость, чем материал между ними. В частности проведение экспериментов показало значительный диапазон достигаемых значений шероховатости при электрохимической обработке алюминия Al2. Таким образом, электрохимическая обработка алюминия, совмещённая с механической, при комбинации значений управляемых факторов позволяет достигать шероховатости $Ra = 0,39$ мкм; электрохимическая – $Ra = 0,08$ мкм.

Другие исследования [8], связанные с изучением возможности повышения точности и качества поверхности при электрохимической обработке за счёт применения импульсов тока

сверхвысокой плотности позволили их автору разработать феноменологическую и математическую модели физико-химических процессов в межэлектродном промежутке (МЭП) при протекании импульсных токов сверхвысокой плотности. Были также выявлены зависимости локализации растворения, шероховатости обработанной поверхности и производительности процесса от параметров импульсов тока.

Важно отметить тот установленный факт, что увеличение амплитуды тока позволяет увеличить и локализацию анодного растворения (практически в 2 раза) за счёт более быстрого роста проводимости электролита в областях с меньшими межэлектродными зазорами (МЭЗ). Установлено [8], что в исследуемом диапазоне плотностей тока (400... 2000 А/см²) шероховатость поверхности монотонно уменьшается с увеличением амплитуды и длительности импульсов тока и при обработке хромистой 40X13 и хромоникелевой 12X18Н10Т сталей достигает $Ra = 0,02..0,03$ мкм; при обработке титанового сплава VT6 – $Ra = 0,04..0,06$ мкм.

В исследовательской работе [9] отмечается, что формирование качества поверхности при обработке силуминов с применением электрохимико-механической обработки, включающей токарную, состоит из двух последовательных этапов: снятие припуска с помощью лезвийной механической обработки и анодное растворение материала в химически активной среде. Математическая модель формирования качества поверхности силуминов в данном случае имеет вид:

$$Ra = \frac{\omega^{0,039}}{e^{0,106} \cdot V^{0,06} \cdot U^{0,082}}, \quad (1)$$

где Ra – показатель шероховатости, мкм; V – скорость резания, м/мин; ω – концентрация электролита, %; U – напряжение, В.

Окончательная математическая модель уменьшения шероховатости поверхности при электро-химико-механической обработке для операции резьбонарезания позволила установить следующую зависимость шероховатости от входящих параметров:

$$Ra = \frac{e^{8/39} \cdot \omega^{0,66}}{V^{0,72} \cdot U^{3,86}}. \quad (2)$$

В настоящее время активно развиваются инновационные технологические процессы по созданию деталей из металлических порошков

разных металлов. В частности к таким методам относится селективное лазерное спекание (SLS) и селективное лазерное сплавление (SLM). SLS-метод позволяет получать структуры с относительно высокой пористостью и низкой прочностью, SLM-методом возможно получение более прочных структур, по характеристикам схожих со сплошными структурами после литья, но при этом SLM-метод отличается структурными свойствами вследствие неравномерности распределения температурных полей при кристаллизации сформированного объёма тела детали.

Многими исследователями также уделяется особое внимание формированию микрорельефа поверхности металлических структур после выращивания деталей из металлических порошков. Как отмечается в научно-исследовательских публикациях [10], процесс селективного лазерного плавления (SLM) зависит от многих рабочих параметров, которые по-разному влияют на механические характеристики деталей, изготовленных с помощью SLM, на точность, качество поверхности этих деталей и эффективность этого производственного процесса.

Установки 3D-печати разных производителей отличаются друг от друга конструктивными решениями, параметрами (размерами камеры построения, скоростью сканирования лазерным лучом, типом лазера и его максимальной мощностью) и другими факторами, непосредственно влияющими на конечное формирование качества изготавливаемого изделия. Такой широкий разброс технических характеристик оборудования представляет собой особую технологическую проблему для получения нормируемой точности изготовления и шероховатости поверхности определенного диапазона значений [11]. Также необходимо учитывать скорость сканирующего оборудования, так как увеличение скорости сканирования (с 40 до 640 мм/с) изменяет топологию и шероховатость напечатанной поверхности и показывает завышенное значение шероховатости, если мощность лазера постоянна [10].

В рамках этого исследования [10] был использован биосовместимый порошок Ti со сферической формой зёрен с размером 15 мкм.

Сканирование проводилось при исследовании формируемых параметров одного контура с целью изучения влияния входных параметров (ET, PD и P) на выходной параметр, который является шероховатостью поверхности

Ra:

$$Ra(ET, PD, P) = C1 + C2 \cdot ET + C3 \cdot PD + C4 \cdot P + C5 \cdot ET \cdot P + C6 \cdot PD \cdot P + C7 \cdot ET^2 + C8 \cdot PD^2 + C9 \cdot P^2, \quad (3)$$

где *ET* – время выдержки луча лазера в точке, мкс; *PD* – расстояние до точки поверхности от источника луча, мкм; *P* – мощность лазера, Вт.

Таким образом, рекомендуется [10] для объёмной печати SLM-методом из порошков титана с размером зерна 15...45 мкм для достижения меньших значений *Ra* (менее 4 мкм) и высокой производительности процесса использовать значения входящих факторов в следующих интервалах: *PD* = 20...30 мкм; *ET* = 84...107 мкс и мощность лазера *P* = 120...135 Вт.

В работе [11] в качестве объектов исследования рассматривались образцы, полученные из отечественного порошка высокохромистого жаропрочного никелевого сплава ЭП648 со следующим содержанием химических элементов, % масс:

Cr – 32...35;
Al – 0,5...1,1;
Ti – 0,5...1,1;
Nb – 0,5...1,1;
Mo – 2,3...3,3;
W – 4,3...5,3;
C – до 0,1;
Ni – остальное.

Для экспериментов использовался порошок сферической формы основной фракции 10...63 мкм. Минимальные значения параметра шероховатости *Ra* поверхности образцов, полученные при *V* = 1100 мм/с, составили соответственно 4,5 и 5,7 мкм. При *V* = 995...1170 мм/с параметр *Ra* = 5,7...6,3 мкм. Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить [11] уравнения регрессии, описывающие зависимость среднеарифметического отклонения профиля от скорости сканирования:

$$Ra(V) = 115,25455 - 0,21772V + 1,21881 \cdot 10^4 \cdot V^2 - 1,31481 \cdot 10^8 \cdot V^3. \quad (4)$$

Множество научных исследований позволяет сделать вывод о широком разнообразии методов исследований и различного понимания корреляции управляемых факторов при построении математических моделей для того или иного изучаемого материала.

Если учесть, что при современных методах формообразования на примере селективного лазерного сплавления шероховатость *Ra* колеблется в значительных пределах и для снижения шероховатости до значений *Ra* = 0,02 мкм потребуется дополнительная чистовая обработка поверхности, то целесообразно применять электрохимическую обработку. В таком случае окончательный параметр *Ra* будет зависеть от совокупного действия факторов, как влияющих на процесс SLM, так и на формирование поверхностных структур при корректировке поверхности электрохимическим способом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Васин, С.А.** Проектирование сменных многогранных пластин. Методологические принципы. – М.: Машиностроение, 2006. – 352 с.
2. **Каталог АВ Sandvik Coromant.** Высокопроизводительная обработка резанием. – М.: Полиграфия, 2003. – 301 с.
3. **Макаров, В.Ф., Семиколенных, В.В., Чигодаев, Н.Е., Веснин, Г.В.** Интенсификация лезвийной и абразивной обработки труднообрабатываемых материалов на основе физической оптимизации процессов резания // Инструмент и технологии. – 2004. – №17–18. – С. 129–135.
4. **Подураев, В.Н.** Резание труднообрабатываемых материалов: учебное пособие для ВУЗов. М.: Высшая школа, 1974. – 476 с.
5. **Бреев, С.В., Серебrenникова, А.Г.** Высокоскоростное фрезерование труднообрабатываемых материалов: Ч.2. Особенности обрабатываемости при фрезеровании // Сб. тр. Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета: Учёные записки. – № IV-1 (16). – 2013. – С.59-66.
6. **Грубый, С.В., Зайцев, А.М.** Повышение эффективности технологии фрезерной обработки деталей из перспективных алюминиевых сплавов на современном оборудовании с ЧПУ. URL: <http://mt2.bmstu.ru/old/BMR2010/a2/5.pdf>
7. **Дроздов, А.В., Киселёв, М.Г.** Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учебное издание. – Минск: БНТУ. 2009. – 148 с.
8. **Смирнов, М.С.** Электрохимическая обработка импульсами тока микросекундной длительности, Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД. Научная школа УГАТУ /М.С. Смирнов, И.Л.Агафонов, С.В. Безруков и др. – Уфа: УГАТУ, 2002. – С. 185 - 208.
9. **Мо Наинг У.** Влияние технологических способов формообразования на качество поверхности алюминиевых сплавов VIII Региональная науч.-практ. студ. конф. Филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный ин-

дустриальный университет». – Сборник. – Ч. 1. Кинешма. 2013. – С.70–74.

10. Balc Nicolae, Cosma Sorin Cosmin, Kessler Julia, Mager Voicu. Research on improving the outer surface quality of the parts made by SLM. Modern Technologies in Manufacturing (MTeM). Applied Mechanics and Materials (2015) Trans Tech Publications, Switzerland, – pp. 199-204.

11. Сухов Д.И., Неруш С.В., Беляков С.В., Мазалов П.Б. Исследование параметров шероховатости поверхностного слоя и точности изготовления изделий аддитивного производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – С. 73-84.

REFERENCES

1. Vasin, S.A. *Design of Replaceable Polygon Inserts. Methodological Principles*. M.: Mechanical Engineering, 2006. – pp. 352.

2. AB Sandvik Coromant Catalogue. *High-capacity Cutting*. – M.: Polygraphy, 2003. – 2003. – pp. 301.

3. Makarov, V.F., Semikolennykh, V.V., Chigodaev, N.E., Vesnin, G.V. Intensification of edge and abrasive processing of hard-to-machine materials based on cutting physical optimization // *Tools and Technology*. – 2004. – No.17-18. – pp. 129-135.

4. Poduraev, V.N. *Hard-to-machine Material Cutting: college manual*. M.: Higher School, 1974. – pp. 476.

5. Breev, S.V., Serebrennikova, A.G. High-speed milling of hard-to-machine materials: Part 2. Machinability Peculiarities at Milling // *Proceedings of Komsomolsk-upon-Amur State*

Technical University: Transactions. No.IV-1 (16). – 2013. – pp. 59-66.

6. Gruby, S.V., Zaitsev, A.M. Milling Technology Effectiveness Increase of Parts Made of Promising Aluminum Alloys on Modern NC Machines.: <http://mt2.bmstu.ru/old/BMR2010/a2/5.pdf>

7. Drozdov, A.V., Kiselyov, M.G. *Electro-physical and Electro-chemical Methods of Material Processing*: educational edition. – Minsk: BNTU. 2009. – pp. 148.

8. Smirnov, M.S. *Electro-chemical Processing with Current Pulses of Micro-Second Duration, Technological Support of GTE Parts Operation Properties. Scientific School of USA-TU / M.S. Smirnov, I.L. Agafonov, S.V. Bezrukov et al.* – Ufa: USATU, 2002. – pp. 185 – 208.

9. Mo Naing U. Impact of shaping technological methods upon surface quality in aluminum alloys. *The VIII-th Regional Scientif.-Pract. Stud. Conf. Branch of FSBEI HVE "Moscow State Industrial University"*. – Collection. Part 1. Kineshma, 2013. – pp. 70-74.

10. Balc Nicolae, Cosma Sorin Cosmin, Kessler Julia, Mager Voicu. Research on improving the outer surface quality of the parts made by SLM. Modern Technologies in Manufacturing (MTeM). Applied Mechanics and Materials (2015) Trans Tech Publications, Switzerland, – pp. 199-204.

11. Sukhov, D.I., Nerush, S.V., Belyakov, S.V. Mazalov, P.B. Investigation of surface layer roughness parameters and production accuracy of products of additive production // *Proceedings of Higher Education Colleges. Mechanical Engineering*. – 2017. – pp. 73-84.

Рецензент д.т.н. Д.Г. Евсеев

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru