

Технология обеспечения качества поверхности алюмоматричных композиционных материалов

Ю.С. Иванова, Д.В. Виноградов, И.И. Кравченко
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

В работе исследовано влияние размера армирующих частиц на шероховатость после точения, а также структура поверхностного слоя заготовки алюмоматричного композиционного материала с матрицей из алюминиевого сплава АК12 и наполнителем из карбида кремния. Предложена технология повышения качества поверхности для обеспечения требуемых в эксплуатации параметров. Предложено за счет одновременного воздействия потока концентрированной энергии и поверхностной пластической деформации понизить пористость и шероховатость поверхности, при этом обеспечивая точность получаемого размера.

Technology of surface quality provided of aluminum matrix composite materials

Y.S. Ivanova, D.V. Vinogradov, I.I. Kravchenko
BMSTU, Moscow, Russia

The influence of the size of reinforcing particles on the roughness after turning, as well as the structure of the surface layer of the workpiece of a composite material, with an AlSi12 aluminum alloy matrix and a silicon carbide particle, has been studied. A technology for improving the quality of the surface has been proposed to ensure the parameters required in operation. It is proposed to reduce the porosity and roughness of the surface due to the simultaneous action of the concentrated energy flow and surface plastic deformation, while ensuring the accuracy of the resulting size.

1. Введение

Современное авиастроение претерпевает изменения, требующие внедрения новых материалов, в том числе композиционных материалов на металлической основе [1]. Конкурентные преимущества изделий из таких материалов обеспечиваются прежде всего повышением прочностных и снижением весовых характеристик по сравнению с традиционными используемыми материалами [2]. Целенаправленное регулирование состава и совершенствование методов изготовления позволяет выйти на принципиально новый уровень эксплуатационных свойств при низкой себестоимости изготовления.

В настоящее время актуально заменять материалы деталей трущихся пар с бронзы на композиционные материалы с матрицей из алюминия (Al) и наполнителем из карбида кремния (SiC), преимущества которых перед традиционными материалами деталей трущихся пар были доказаны в работах ученых Т.А. Чернышовой, Ю.А. Кургановой, Есинори Нисиды (Япония) и др. на примерах применения в деталях машин, изготавливаемых такими машиностроительными предприятиями, как Lockheed Martin, Honda, Suzuki Motor и др.

Одной из основных причин выхода из строя

машин при нормальных условиях эксплуатации является износ функциональных поверхностей деталей машин вследствие концентраций напряжений в микронеровностях, а также действия паров жидкости окружающей среды, создающих в микронеровностях высокое давление, что приводит к изменению размеров в процессе эксплуатации. Влияние вышеуказанных факторов на срок службы машины снижают путем улучшения шероховатости функциональных поверхностей. Таким образом, шероховатость поверхности является одним из важнейших показателей качества деталей машин.

Шероховатость трущихся поверхностей деталей машин (кольца подшипников, опорные шейки валов, поршневые втулки блока цилиндров, тормозные диски и т.п.) составляет $Ra = 0,63 \dots 1,6$. Одним из методов достижения данных параметров является чистовое точение.

В работах [2; 3] приводят рекомендации компании Duralcan для режимов механической обработки, примеры удачного применения алюмоматричных композиционных материалов (АМКМ) в деталях машин типа тормозных дисков, роликов конвейера и направляющих втулок поршней блока цилиндров. Ю.А. Курганова [2] обосновывает необходимость внедрения алюмоматричных композиционных

материалов с целью повышения эксплуатационных характеристик деталей машин для удовлетворения новых повышенных требований к прочности, жесткости и износостойкости.

АМКМ с наполнителем из карбида кремния обладает высокими временным сопротивлением и пределом выносливости (на 50...100% по сравнению с обычными сплавами), модулем упругости и коэффициентом жесткости, пониженной склонностью к трещинообразованию, высокой жаропрочностью и гидрофобностью.

В работах [4; 5] показано некоторое уменьшение силы резания и шероховатости обработанной поверхности при сверлении заготовок из АМКМ по сравнению с алюминиевым сплавом без добавок карбида кремния.

Ученые в [4] привели значения сил резания по результатам проводимого эксперимента при точении алмазным резцом АМКМ дисперсно-упрочненным карбидом кремния.

Твердость карбида кремния составляет около 75 HRC, что вызывает проблемы при обработке резанием из-за его твердости, близкой к твердости инструментального материала (алмаз, PCD ~ 80 HRC). При точении АМКМ, дисперсно-упрочненных карбидом кремния, карбид кремния выкрашивается с проточенной поверхности, оставляя на ней следы в виде лунок, что влияет на полученную шероховатость поверхности.

Однако методы лезвийной обработки таких материалов не позволяют повысить плотность, улучшить адгезию между матрицей и армирующими частицами, снизить пористость поверхностных слоев деталей и достаточно затратны при снижении шероховатости и обеспечении точности размеров. Предлагается технология финишной электро-механической обработки (ФЭМО), которая позволяет за один рабочий ход инструмента воздействовать на поверхностный слой концентрированным потоком энергии и одновременно пластически деформировать рабочую поверхность детали, формируя характерный для пластической деформации микрорельеф поверхности и требуемую точность размера.

2. Основная часть

В работе рассматривали втулки из алюмоматричного композиционного материала, армированного частицами SiC, полученные методом центробежного литья (рис. 1).

Центробежному литью предшествовало механическое перемешивание для равномерного распределения SiCp в матрице алюминиевого сплава,

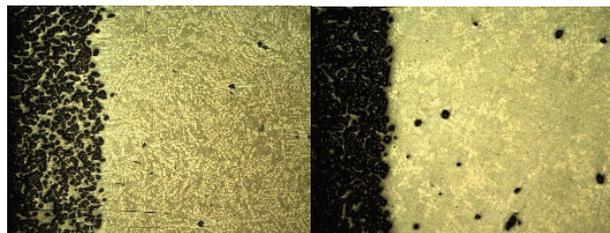


Рис. 1. Микроструктура образца состава АК12 + 5% SiC, × 50. Наружная поверхность втулки

благодаря разнице в плотности для вытеснения SiCp во внешнюю поверхность под действием центробежной силы. Размер частиц составляет 20 мкм, а содержание – 5%.

SiCp сначала подвергают предварительной обработке путем нагревания до 300°C, а затем смачивают в течение двух часов для удаления влаги и органических веществ. Затем его нагревают до 850°C и выдерживают в течение восьми часов при непрерывном перемешивании для образования на поверхности SiCp пленки оксида SiO₂, который вступает в реакцию с основой и улучшает смачиваемость. Затем его медленно добавляют в жидкость основного металла при температуре 700...750°C, контролируя скорость и время перемешивания, чтобы уменьшить окисление основного металла. Наконец, его помещают в машину центробежного литья.

Уравнение центробежной силы:

$$F = m\omega^2 R = \frac{\pi^2 m n^2 R}{900} \approx 0,011 m R n^2,$$

где F – центробежная сила; m – масса металлической жидкости; ω – угловая скорость вращения отливки; R – радиус вращения; n – скорость вращения.

$$\rho_{SiC} = 3,2 > \rho_{Al} = 2,7 \text{ г/см}^{-3}.$$

Плотность SiCp больше, чем плотность алюминиевой жидкости, и центробежная сила больше, поэтому легче смещать агрегацию к внешней поверхности втулки, тем самым увеличивая твердость

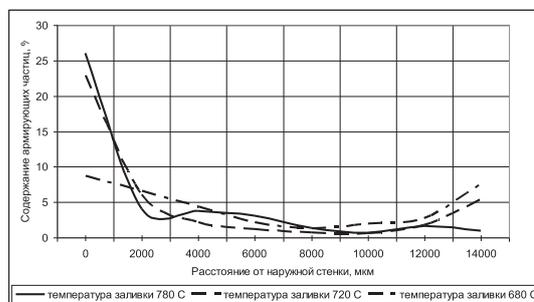


Рис. 2. Распределение армирующих частиц в образце состава АК12 + 5% SiC в зависимости от температуры заливки расплава, частота вращения в печи 1500 об/мин

внешней поверхности (рис. 2).

Производили последующую механическую обработку – точение по наружной, внутренней и торцовым поверхностям.

В процессе точения основным фактором, влияющим на шероховатость, являются частицы упрочняющей фазы в композиционном материале, их разные размеры могут вызвать значительные изменения шероховатости.

Исходя из геометрических характеристик этого сечения, найдем геометрическую жесткость сечения:

$$W_y = \frac{I_y}{X_{\max}} = \frac{I_{y1} - 2I_{y2}}{X_{\max}} = \frac{d^3}{6} - \left(\frac{\pi d^3}{32} + \frac{\pi d(d-\delta)^2}{4} \right),$$

где I_{y1} – момент инерции квадрата со стороной d относительно оси изгиба заусенца; I_{y2} – момент инерции полукруга диаметром $d - \delta$ относительно оси изгиба заусенца; X_{\max} – максимальное расстояние до оси изгиба заусенца.

$$W_y = \frac{P_z x}{\sigma},$$

где P_z – осевая сила резания; σ – предел прочности материала матрицы.

Формула для ширины заусенца (δ) может быть рассчитана как:

$$\delta = d - \sqrt{\frac{2d^2}{3\pi} - \frac{4P_z x}{\sigma d \pi} = \frac{d^2}{8}},$$

$$x = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d-\delta}{2}\right)^2}.$$

Окончательный результат таков:

$$\delta = d - \sqrt{\frac{2d^2}{3\pi} - \frac{4P_z \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d-\delta}{2}\right)^2}}{\sigma d \pi} - \frac{d^2}{8}},$$

$$R_z(d) = \frac{d}{2} - x.$$

Результаты расчета строятся в виде корреляционного графика (рис. 3).

С увеличением диаметра частиц повышается шероховатость поверхности. Основной причиной являются ямки, усадочные отверстия и другие дефекты, которые возникают, когда частицы отваливаются в процессе точения. Когда диаметр частиц слишком велик, это приведет к резкому увеличению шероховатости поверхности и ухудшит

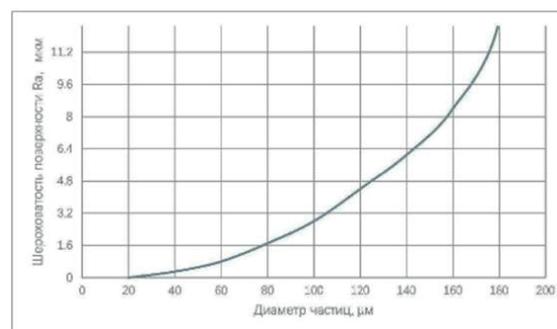


Рис. 3. Шероховатость поверхности материалов Al/SiCr в зависимости от размера частиц наполнителя

эксплуатационные характеристики деталей.

Производилась последующая механическая обработка – точение по наружной, внутренней и торцовым поверхностям.

Окончательную обработку втулок по геометрическим параметрам и свойствам производили с применением технологии электромеханической обработки.

В зависимости от назначения и типа обрабатываемых деталей для финишной электромеханической обработки могут быть использованы токарные, фрезерные и другие металлорежущие станки. В качестве источника переменного тока используют понижающие трансформаторы с питанием от сети напряжением 220/380 В. Мощность трансформатора выбирали в зависимости от технологического назначения: характера обрабатываемых деталей, их размеров, конструкции инструмента, серийности производства.

При ФЭМО изменяется микрогеометрия ранее обработанной поверхности, но сама форма детали остается без изменений. Поэтому втулки, обрабатываемые этим способом, не должны иметь отклонений геометрической формы, выходящих за пределы технических требований чертежа детали, полученной методом центробежного литья. В тех случаях, когда затруднительно точно установить детали, ФЭМО рекомендуется выполнять на том станке, на котором производили механическую обработку.

Резкое снижение шероховатости в зависимости от усилия ФЭМО в 6...12 раз по параметру Ra, в сравнении с исходной, объясняется воздействием больших пластических деформаций, точечного контакта и сдвиговых деформаций, возникающих в местах при скольжении ролика по обрабатываемой поверхности. Одновременно под действием повышенной температуры происходит сглаживание неровностей, остающихся на поверхности после прохода инструмента, что дает возможность получить

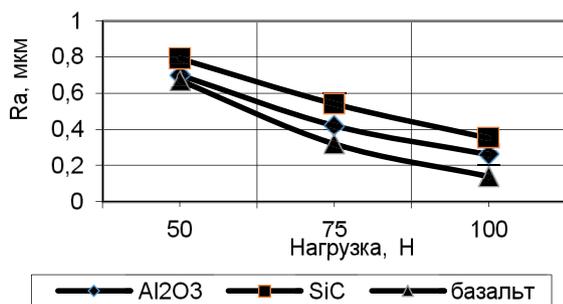


Рис. 4. Шероховатость в зависимости от типа армирующих частиц при ФЭМО втулки

более высокую чистоту обрабатываемой поверхности.

На рис. 4 представлен график изменения шероховатости по Ra в зависимости от усилия прижатия ролика к обрабатываемой поверхности. Можно отметить, что при равных условиях шероховатость уменьшается с увеличением усилия ФЭМО. Объясняется это, в первую очередь, физико-механическими свойствами исследуемых составов градиентных композиционных материалов (ГКМ) на базе алюминиевого сплава АК12.

При рассмотрении фотографий микроструктуры продольного разреза втулки после ФЭМО с силой тока 250 А сплошной слой с измененной структурой не образуется, но отчетливо видно формирование скоплений, глобул, что свидетельствует о наличии при ФЭМО процесса сглаживания. Микрорельеф поверхностного слоя втулки имеет сглаженную форму, что объясняется одновременным воздействием температуры и давления. Поверхностный слой имеет меньшую шероховатость для всех армирующих фаз ГКМ. Это подтверждает тот факт, что одновременно с высокотемпературным нагревом имеет место пластическая деформация.

На основании вышеизложенного ФЭМО является окончательным этапом обработки поверхности. В связи со своей конструктивной простотой ФЭМО может в полной мере заменять трудоемкие финишные операции, такие как шлифование, тонкое точение, полирование.

3. Заключение

Исследовано влияние размера частиц наполнителя при точении градиентного композиционного материала АК12 + 5%SiC на шероховатость поверхности деталей. Предложена и апробирована технология финишной электромеханической обработки втулок из градиентных композиционных материалов с целью получения высокой твердости, оптимальной шероховатости, плотности и износостойкости наружного поверхностного слоя. Микротвердость втулок после финишной электромеханической обработки увеличилась на 25...30% по сравнению с дисперсно-наполненными ГКМ и на 90...120% по сравнению с твердостью АК12.

Список использованных источников

- [1] Study of Cutting force and Surface Roughness in machining of Al alloy Hybrid Composite and Optimized using Response Surface Methodology / K. Venkatesan, R. Ramanujam, J. Joel, et al. // 12th Global Congress on Manufacturing And Management, GCMM 2014.
- [2] Курганова Ю.А. Перспективы развития металломатричных композиционных материалов промышленного назначения // Сервис в России и за рубежом. 2012. № 3 (30). С. 235–240.
- [3] Yoshinori Nishida. Introduction to Metal Matrix Composites: Fabrication and Recycling. Springer, 2013. 218 p.
- [4] Chen Y., Vinogradov D.V., Kurganov S.V. Cutting properties of aluminum matrix composites / Y // Journal of Physics: Conference Series. 2021. P. 012007. DOI 10.1088/1742-6596/1990/1/012007.
- [5] Обрабатываемость резанием композиционных материалов на основе алюминия / П.В. Аношко, З.Ю. Коссова, И. Чэнь и др. // Будущее машиностроения России: сборник докладов: в 2 т. Т. 1. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 3–5.