

Сведения о выполненных работах и полученных научных результатах  
в период с 14.08.2023 г. по 30.06.2024 г.

по проекту **«Разработка научных основ обеспечения обрабатываемости и  
формообразования металлических материалов, полученных путём аддитивного  
производства, в условиях механического  
и физико-технического управляемого воздействия»**,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 23-79-10166

Руководитель: канд. техн. наук Бабаев Артём Сергеевич

1. Для создания экспериментальных образцов использовалась технология прямого лазерного выращивания (Laser Metal Deposition – LMD) и комбинация порошков, формирующая сплав 12X18H10T. Были получены образцы, часть из которых была использована для проведения испытаний на физико-механические свойства, а оставшаяся часть из той же самой партии синтеза – для непосредственно изучения вопросов обрабатываемости при фрезеровании.

2. С применением оборудования для пробоподготовки было подготовлено образцы для РЭМ и спектрального анализа химических компонентов. С использованием растрового микроскопа мод. Tescan Vega SBH с приставкой для энергодисперсионного микроанализа AztecLive Lite Xplore 30 установлен химический состав исследуемой стали (медианное значение, масс %): Cr 18,19; Ni 10,67; Mn 1,14; Si 0,54; Ti 0,51; Cu 0,18; V 0,1; Mo 0,17; C 0,06; Fe – остальное. Данный состав позволяет отнести к сплаву марки 12X18H10T (согласно ГОСТ 5632-2014 «Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки»). Исследование методом рентгенофазового анализа показало, что на дифрактограмме присутствуют фазы, характерные аустениту (гране-центрированная решётка) и отдельные пики феррита (объёмно-центрированная решётка). Последнее было подтверждено в ходе исследования травленных микрошлифов.

3. Механические характеристики определяли путём растяжения образцов до разрушения на испытательной машине мод. INSTRON 3369 при растяжении выполняли согласно ГОСТ 1497-84, а ударную вязкость на копре согласно ГОСТ 9454-78. Были получены и статистически обработаны следующие данные: предел прочности  $\sigma_{0,2}$ , МПа: вдоль  $412 \pm 20$ , поперёк  $387 \pm 16$ ; предел текучести  $\sigma_b$ , МПа: вдоль  $627 \pm 34$  МПа, поперёк  $606 \pm 28$ ; относительное удлинение  $\delta_5$ , %: вдоль  $48,2 \pm 1,5$ , поперёк  $51,2 \pm 2$ ; относительное сужение  $\psi$ , %: вдоль 80, поперёк 75-79; ударная вязкость КСУ, кДж/см<sup>2</sup>: вдоль  $271 \pm 18$ , поперёк  $286 \pm 21$ . Существенной разницы в твёрдости в зависимости от направления (вдоль и поперёк траектории «выращивания») обнаружено не было, колебания значений НВ 193...205.

4. Испытания на обрабатываемость при фрезеровании выполнялось на обрабатывающем центре модели DMU 50, производства DMG (Германия). В состав лабораторного стенда также входили трёхкомпонентный динамометр

Kistler мод. 9257BA и профилометр-профилограф мод. SJ-210 Mitutoyo. Исследование микрогеометрии режущего инструмента выполняли на специальном микроскопе EdgeMasterX, Alicona (Швейцария), позволяющем в автоматическом режиме сканировать кромку и опередить параметры (острота, симметричность, шероховатость). Режимы резания принимались согласно отработанным на практике производственным рекомендациям с целью экспериментального определения наибольшей возможной подачи по прочности фрезы и её зубьев, то есть увеличенного объёма срезаемой стружки.

5. Серия экспериментов по фрезерованию производилась на 9-ти режимах. При этом изменяли скорость резания, подачу на зуб и толщину резания. С помощью токарного динамометра измеряли силы резания с частотой 10кГц на протяжении 5 секунд с момента установившегося резания, то есть входа всех зубьев фрезы в контакт с заготовкой. Собранный массив данных по каждому из 9-ти экспериментов составлял из не менее чем 50.000 точек для каждой из трёх составляющих сил резания. В процессе фрезерования отслеживали износ по задней поверхности фрезы, не допуская его превышения более чем на 0,3-0,35 мм. Шероховатость  $R_a$  на обработанных поверхностях измеряли по 3-5 раз. Вычисление коэффициентов и констант регрессионной модели проводили по построенным эмпирическим графикам и с использованием инструментов в STATISTICA.

6. Для расчёта НДС режущего инструмента к 3D модели прикладываются внешние нагрузки в виде эпюр контактных напряжений, поэтому так важно знать их величину и распределение. Нагрузки (силы резания) были получены в ходе натурального эксперимента с использованием динамометра Kistler. Расчёты НДС МКЭ с использованием программы ANSYS для фрезерования вдоль и поперёк направления роста стали 12X18H10T, полученной из порошка путём лазерного спекания, показали, что у инструмента из твёрдого сплава с геометрией и на режимах соответствующих эксперименту формируются наибольшие эквивалентные напряжения  $\sigma_{\text{max}} = 1181$  МПа, что меньше предела прочности на изгиб  $\sigma_{\text{и}} = 1300$  МПа. Увеличение режимов приводит к разрушению режущих зубьев фрезы в процессе фрезерования, что подтверждается численными значениями эквивалентных напряжений, превышающими предел прочности при изгибе, полученными в ходе моделирования в Ansys.

7. По результатам теоретической систематизации и анализа методов исследования процесса стружкообразования был произведён очный доклад. После доклада участниками секции «Современные производственные технологии» обсуждены выводы и наблюдения, полученные в ходе подготовке доклада. Библиографические данные: Козлов В.Н., Бабаев А.С., Семёнов А.Р. Методы исследования процесса стружкообразования при обработке конструкционных сталей // Современные проблемы машиностроения: сборник статей XVI Международной научно-технической конференции, 27 ноября – 1 декабря 2023 г. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2024. С. 217–222.

По результатам отработки методики расчёта сил резания был выполнен очный доклад, проведено обсуждение предложенных выводов и в последствии опубликована статья в сборнике. Библиографические данные: Козлов В.Н., Бабаев А.С., Шевчук А.С. Определение погрешности расчёта сил резания при концевом фрезеровании стали // Современные проблемы машиностроения: сборник статей XVI Международной научно-технической конференции, 27 ноября – 1 декабря 2023 г. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2024. С. 212–216.

8. В ходе теоретических исследований и выработки методики расчёта контактных напряжений на рабочих площадках режущих кромок была опубликована статья: Study of a Methodology for Calculating Contact Stresses during Blade Processing of Structural Steel / A.S. Babaev, N.A. Schulz, A.R. Semenov, A.S. Shevchuk [et al] // Metals. 2023. Vol. 13, № 12. Art. num. 2009. DOI: 10.3390/met13122009. Журнал Metals (ISSN 20754701) входит в Q1 «Metals and Alloys» (SJR 0,58 за 2022 г.).

По результатам экспериментальных работ подготовлены и приняты к печати две рукописи статей: «Исследование влияния параметров микрогеометрии режущих кромок на силы резания, износ и обрабатываемость при фрезеровании» в журнал Вестник машиностроения (ожидаемая дата выхода август 2024 г.) и «Исследование сил резания и обрабатываемости при фрезеровании порошковой коррозионно-стойкой стали, полученной по технологии прямого лазерного выращивания (LMD)» в журнал Обработка металлов (технология - оборудование - инструменты) (ожидаемая дата выхода 2-й номер 2024 г.).