

УДК 621.91.01+621.431.75

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 10X11H23T3MP-ВД ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2014 О.С. Сурков, А.И. Кондратьев, В.П. Алексеев, А.И. Хаймович

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье рассмотрены вопросы обрабатываемости жаропрочной хромоникелевой стали 10X11H23T3 MP-ВД. Для исследования обрабатываемости жаропрочного материала использовалось современное фрезерное оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ), динамометрический стол Kistler, современный монолитный фрезерный инструмент фирмы Seco. В виде оправки использовался термозажим, обеспечивающий наибольшую жёсткость закрепления. Поставлена серия экспериментов по измерению усилий резания, возникающих в процессе обработки. Для эксперимента были выбраны заготовки в виде пластин. Поверхность каждого образца предварительно обрабатывалась так, чтобы исходная шероховатость у всех образцов была одинаковой Ra 1,25. Материал заготовок - сталь ЭП33 ВД (10X11H23T3MP-ВД). В качестве режущего инструмента в модели используется фреза фирмы Seco. Проведены анализ и обработка результатов эксперимента. По экспериментальным данным построены зависимости усилия резания от скорости, глубины резания и подачи. Зависимости получены с использованием нейросетевых моделей, увязывающих усилия резания с технологическими параметрами. Установлено, что нейросетевая модель даёт более точный прогноз усилий резания, особенно в области повышенных скоростей резания. Смоделирован процесс резания с заданными экспериментальными условиями для сопоставления данных эксперимента и моделирования. Использовано виртуальное моделирование процесса обработки в среде DEFORM 3D.

Механическая обработка, экспериментальные исследования, обрабатываемость, жаропрочные и нержавеющие стали и сплавы, режущий инструмент, усилия резания, режимы резания, нейросетевая модель, модель процесса фрезерования.

В настоящее время многие детали, к которым предъявляют повышенные требования по жаростойкости, изготавливаются из труднообрабатываемых сплавов, обладающих повышенными вязкопластическими свойствами. Механическая обработка данных деталей вызывает ряд трудностей при назначении технологических режимов обработки и подбора геометрии режущей части инструмента.

Сталь 10X11H23T3MP-ВД относится к классу аустенитных. Процесс обработки материалов данного класса сопровождается:

- 1) повышенной температурой в зоне резания, большим трением по контактным поверхностям, что приводит к ухудшению обрабатываемости и износу инструмента;
- 2) повышенной истирающей способностью жаропрочных материалов, что вызывает необходимость применять инструментальные материалы, имеющие наряду с большой прочностью и высокую износостойкость.

Основные особенности резания жаропрочных и нержавеющих сталей и

сплавов, затрудняющие их механическую обработку это вязкопластическое упрочнение материала в процессе деформации резанием.

Для исследования рациональных областей обработки резанием обычно требуется большой объём натуральных испытаний. Целью данной работы является не только определение этой области, но и методическое обоснование уменьшения объёма экспериментальных исследований. Для этой цели было использовано виртуальное моделирование процесса обработки в среде DEFORM 3D.

Пониженная виброустойчивость движения резания обусловлена высокой упрочняемостью нержавеющих и жаропрочных материалов при неравномерности протекания процесса их пластического деформирования. Возникновение вибраций приводит к переменным силовым и тепловым нагрузкам на рабочие поверхности инструмента и, следовательно, к микро- и макровыкрашиваниям режущих кромок. При наличии вибраций особенно неблагоприятное влияние на износ инст-

румента оказывают явления схватывания стружки с его передней поверхностью.

Для исследования обрабатываемости жаропрочного материала использовалось современное фрезерное оборудование с ЧПУ, динамометрический стол Kistler, современный монолитный фрезерный инструмент фирмы Seco. В качестве оправки использовался термозажим, обеспечивающий наибольшую жёсткость закрепления.

Калибровочный проход выполняется всегда на одних и тех же режимах резания (одинаковая подача, скорость резания, глубина резания и т.д.). Калибровочный проход необходим для обеспечения при проведении эксперимента однотипных условий, таких как шероховатость поверхности, вылет заготовки и т.д.

Для эксперимента были выбраны заготовки $D \times B \times L = 40 \times 24 \times 6$ (мм). Поверхность каждого образца предваритель-

но обрабатывалась так, чтобы исходная шероховатость у всех образцов была одинакова $Ra = 1,25$. Материал заготовок: сталь ЭП33 ВД (10X11H23T3MP-ВД).

При проведении эксперимента скорость резания изменялась от 45 до 75 м/мин, подача на зуб 0,05 ... 0,2 мм/зуб, боковой съём a_e 0,1 ... 0,5 мм. Этот диапазон скоростей, подач и величина съёма являются наиболее применяемыми при механической обработке резанием.

Регистрация изменения составляющих усилия резания F_x , F_y , F_z в реальном времени регистрировались динамометром Kistler модели 9257B, установленным на столе станка ALZMETALL BAZ 15 CNC.

При измерении сил резания были получены графические зависимости составляющих F_x , F_y , F_z силы резания от времени. На рис. 1 представлены данные по 8 каналам измерения и зависимости F_x , F_y , F_z для сплава 10x11h23t3mp-вд.

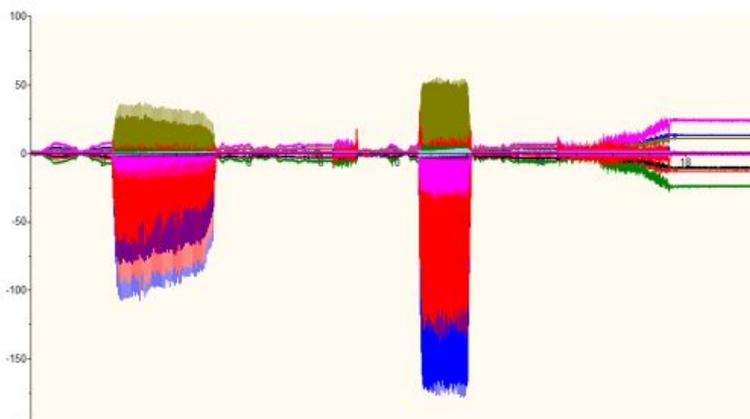


Рис.1. Данные по 8 каналам измерения и зависимости F_x , F_y , F_z

По экспериментальным данным построены зависимости усилия резания от скорости, глубины резания и подачи. Зависимости получены с использованием нейросетевых моделей, увязывающих усилия резания с технологическими параметрами (рис. 2).

Для сравнения была апробирована регрессионная модель для силы резания (рис. 3).

Установлено, что нейросетевая модель даёт более точный прогноз усилий резания, особенно в области повышенных скоростей резания.

Анализ полученных моделей свидетельствует, что в диапазоне скоростей резания 45-50 м/мин независимо от глубины резания (в пределах 0,1...0,55 мм) при снижении подачи на зуб менее 0,14 мм/зуб наблюдается усиленный наклёп поверхности и увеличение контактного трения. С увеличением скорости резания (более 50 м/мин) при небольших подачах 0,03 ... 0,10 мм/зуб за счёт разогрева металла в зоне стружкообразования по контактными поверхностям происходит дальнейшее увеличение коэффициента трения вплоть до предельного значения ($\mu = 0,577$).

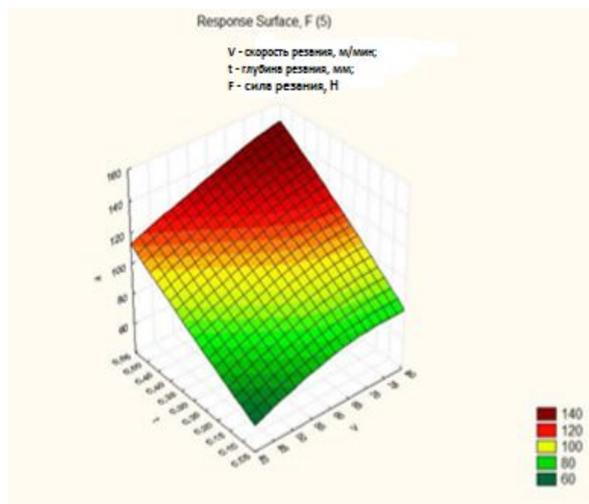


Рис. 2. Поверхность отклика зависимости силы резания от скорости и глубины резания. Нейросетевая модель

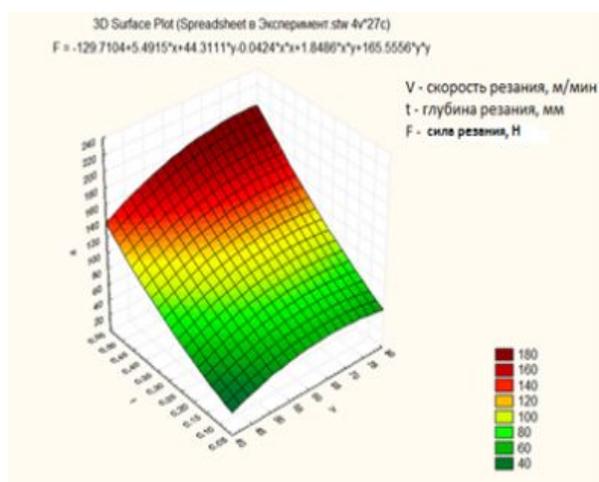


Рис. 3. Поверхность отклика зависимости силы резания от скорости и глубины резания. Регрессионная квадратичная модель

В области скоростей резания 45-55 м/мин наиболее рациональные режимы резания с точки зрения минимизации силы резания (менее 100Н) реализуются при подачах 0,12 ... 0,22 мм/зуб.

При подачах более 0,12 с ростом скорости резания (более 60 м/мин) наблюдается интенсивный рост усилия резания за счёт термического эффекта пластической деформации, приводящей к повышению вязких свойств материала и упрочнению за счёт роста интенсивности скорости деформации. Как следует из рис. 4, обработка со скоростями резания выше 60м/мин возможна только в ограниченном диапазоне подач – менее 0,08 мм/зуб.

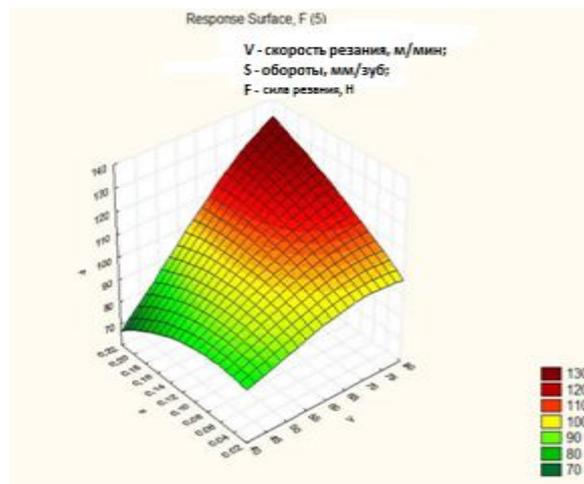


Рис. 4. Поверхность отклика зависимости силы резания от скорости и подачи на зуб. Нейросетевая модель

Поскольку проведение натурных испытаний связано со значительными затратами на закупку опытного инструмента и заготовки, целесообразно смоделировать процесс резания, с заданными экспериментальными условиями для сопоставления данных эксперимента и моделирования. Для этого предлагается применять следующую модель процесса фрезерования. В качестве режущего инструмента в модели используется фреза фирмы Seco. Модель инструмента представлена на рис. 5.



Рис. 5. Трёхмерная модель фрезы

Модель заготовки представлена в упрощённом виде, но является полным аналогом, используемым в натурном эксперименте. На заготовке был выполнен срез глубиной 0,5 мм, имитирующий по-

верхность после работы предыдущего зуба. Данная операция была выполнена с целью сокращения времени расчёта за счёт оптимальной генерации сетки программой.

Следует отметить, что большое число элементов в сетке повышает точность расчёта, но снижает его скорость. Поэтому необходимо подобрать оптимальное количество элементов, удовлетворяющих требованиям точности и скорости расчёта.

Чтобы представить реальные усло-

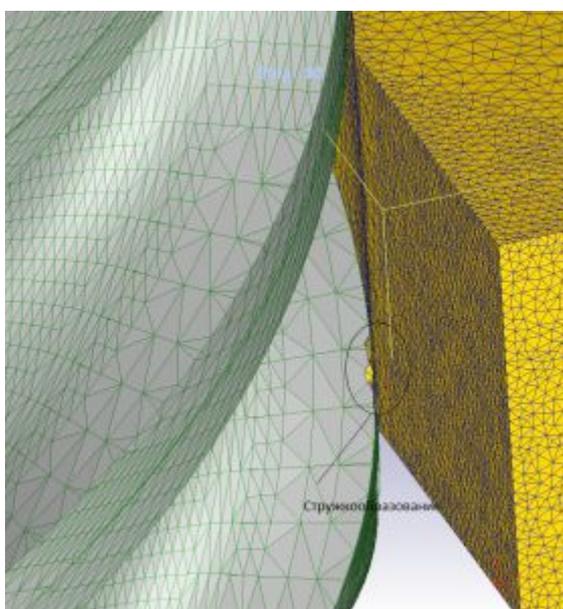


Рис. 6. Модель процесса фрезерования

Выводы

1. По результатам обработки данных экспериментов по боковому фрезерованию образцов из стали 10X11H23T3MP-ВД с диапазоном изменения параметров резания ($V = 45-75$ м/мин; $F = 0,05-0,2$ мм/зуб; $a = 0,1-0,5$ мм) были получены нейросетевые и регрессионные модели усилий резания.

2. Нейросетевая модель даёт более точный результат прогнозирования усилий обработки.

вия резания, были определены два типа граничных условий: механических и температурных. Для механической части нижняя грань заготовка закреплена в направлении резания, а скорость резания применяется как жёсткий инструмент. Начальные тепловые граничные условия соответствуют комнатной температуре. Теплообмен с окружающей средой не учитывается.

Другим физическим параметром, который был рассмотрен, является температура резания. На рис. 6 показана модель процесса фрезерования в DEFORM 3D. Распределение температуры по длине контакта пары «инструмент – заготовка» представлено на рис. 7.

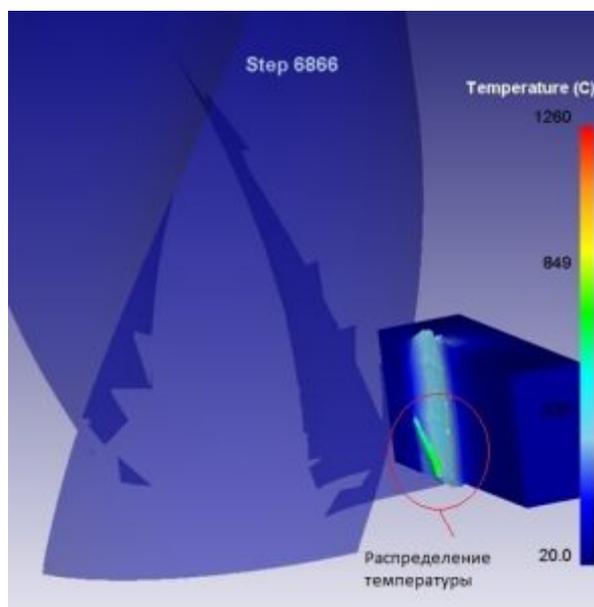


Рис. 9. Распределение температуры в зоне контакта: $V = 45$ м/мин; $F = 0,1$ мм/зуб; $a = 0,5$ мм

3. Выявлено, что область рациональных режимов обработки лежит в диапазоне значений: $V = 45-55$ м/мин; $F = 0,12-0,22$ мм/зуб; $a = 0,1-0,5$ мм.

4. Разработана имитационная модель процесса обработки в среде программного обеспечения DEFORM 3D. Погрешности прогнозирования усилий резания не превышает значения 20%. Для более адекватного результата требуется уточнение данных по реологическим свойствам материала в процессе обработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Ми-нобрнауки) на основании Постановления

Правительства РФ №218 по договору №27/13 от 15.02.2013

Библиографический список

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 343 с.

2. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, 1983. P. 541–547.

3. Follansbee P.S., Kocks U.F. A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold // Acta Metallurgica. 1988. V. 36, no. 1. P. 81-93.

4. Хаймович А.И., Кузнецов А.В. Аналитическое моделирование силового режима высокоскоростного фрезерования материала с вязкопластическим упрочнением // Тезисы докладов симпозиума с

международным участием «Самолётостроение. Проблемы и перспективы». Самара: Артпрестиж, 2011. С. 402.

5. Кондратьев А.И., Кузнецов А.И., Проничев Е.Д. Анализ точностных параметров токарно-фрезерного оборудования, изменяющегося в процессе эксплуатации при изготовлении высокоточных деталей ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 3(34), ч. 3. С. 240-244.

6. Кондратьев А.И., Проничев Н.Д. Пути повышения точности при создании современных технологий многоинструментальной обработки // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 6-3. С. 718-723.

Информация об авторах

Сурков Олег Станиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: ossvbm@mail.ru. Область научных интересов: механическая обработка.

Кондратьев Александр Игоревич, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kondalexigor1987@mail.ru. Область научных интересов: технология производства авиадвигательного строения.

Алексеев Вячеслав Петрович, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: alexeev_v.p@mail.ru. Область научных интересов: механическая обработка и производственный контроль.

Хаймович Александр Исаакович, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: berill_samara@bk.ru. Область научных интересов: технология и машины обработки давлением.

RESEARCH OF MACHINABILITY OF HEAT RESISTANT STEELS 10X11HN23T3MP-ВД USED IN PARTS OF GAS TURBINE ENGINES

© 2014 O.S. Surkov, A.I. Kondrat'ev, V.P. Alexeev, A.I. Haymovich

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

In article questions the workability of heat-resistant chromium-nickel steel 10X11H23T3MP-ВД are considered. To investigate the machinability of heat-resistant material used modern milling machines, CNC torque table Kistler, modern monolithic milling tool company Seco, in the form of the mandrel used termic clamping provides the highest rigidity fixing. Posed a series of experiments to measure the cutting forces that arise during processing. For the experiment were selected workpiece in the form of plates. The surface of each sample is pre-treated so that the initial surface roughness for all samples was the same Ra 1,25. Materials blanks: Steel ЭП33 ВД (10X11H23T3MP-ВД). As a cutting tool in the model used milling company Seco. The analysis and processing of the experimental results are provided. According to experimental data are constructed dependences of the cutting force on the speed, depth of cut and feed. Depending obtained using neural network models, linking cutting forces with the technological parameters. It is established that the neural network model provides a more accurate prediction of cutting forces, especially in the field of higher cutting speeds. Since the full-scale testing was costly for the purchase of an experienced tool and workpiece, the cutting process was modeled with the given experimental conditions for comparison of experimental data and modeling. For this purpose, it was used a virtual simulation of the machining in the environment DEFORM 3D.

Machining, experimental research, machinability, heat-resistant and corrosion-resistant steels and alloys, cutting tools, cutting force, cutting conditions, the neural network model, the milling process in the software DEFORM 3D.

References

1. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov [Fundamentals of the theory of metal cutting]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975. 343 p.
2. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, 1983. P. 541-547.
3. Follansbee P.S., Kocks U.F. A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold // Acta Metallurgica. 1988. V. 36, no. 1. P. 81-93.
4. Haimovich A.I., Kuznetsov A.V. Analysis of the cutting forge of heat resisting alloys during high-speed milling // Proceedings of Symposium "Aircraft. Problems and Prospects." Samara: Artprestizh Publ., 2011. P. 402. (In Russ.)
5. Kondratiev A.I., Kuznetsov A.I., Pronichev N.D. Analysis of the precision parameters of the turning-milling equipment varying in operation in the manufacture of precision parts GTE // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2012. No. 3(34), part 3. P. 240-243. (In Russ.)
6. Kondratiev A.I., Pronichev N.D. Ways of increase of accuracy at creation of modern technologies of multitool processing // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. 2013. V. 15, no. 6-3. P. 718-723. (In Russ.)

About the authors

Surkov Oleg Stanislavovich, Candidate of Science (Engineering), associate professor of the Department production of aircraft engines, Samara State Aerospace University. E – mail: ossvbm@mail.ru. Area of Research: machining.

Kondratiev Alexander Igorevich, Postgraduate Student of the Department pro-

duction of aircraft engines, Samara State Aerospace University. E – mail: kondalexigor1987@mail.ru. Area of Research: Production technology aeroengine .

Alexeev Vyacheslav Petrovich, Postgraduate Student of the Department production of aircraft engines, Samara State Aerospace University. E – mail: alexeev_v.p@

[mail.ru](mailto:berill.samara@bk.ru). Area of Research: machining and production control.

Наумович Александр Исаакович,
Candidate of Science (Engineering), associate professor of the Department production

of aircraft engines, Samara State Aerospace University. E – mail: berill.samara@bk.ru.
Area of Research: Technology and machines for pressure treatment.