



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)




### Теория размерностей и моделирование температуры на границе раздела стружка–инструмент при точении SS304 на основе искусственных нейронных сетей

Атул Кулкарни<sup>1, а</sup>, Сатиш Чинчаникар<sup>1, в, \*</sup>, Викас Саргаде<sup>2, с</sup>

<sup>1</sup> Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Пуне – 411048, Махараштра, Индия

<sup>2</sup> Технологический университет им. доктора Бабахабе Амбедкара, Видьявихар, Лонере, округ Райгад - 402103, Махараштра, Индия

<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>,  [atul.kulkarni@viit.ac.in](mailto:atul.kulkarni@viit.ac.in), <sup>в</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  [satish.chinchaniкар@viit.ac.in](mailto:satish.chinchaniкар@viit.ac.in),

<sup>с</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8855-112X>, [vgsargade@dbatu.ac.in](mailto:vgsargade@dbatu.ac.in)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

#### История статьи:

Поступила: 29 июля 2021

Рецензирование: 19 августа 2021

Принята к печати: 07 сентября 2021

Доступно онлайн: 15 декабря 2021

#### Ключевые слова:

Температуры поверхности стружка–инструмент

Теория размерностей

Искусственная нейронная сеть

Инструменты с покрытием

SS304

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Во время механической обработки результирующая температура оказывает более широкое и критическое влияние на производительность обработки. Во время обработки потребляемая мощность в основном преобразуется в тепло вблизи режущей кромки инструмента. Почти вся работа, выполняемая при пластической деформации, превращается в тепло. Исследователи приложили много усилий для измерения температуры резания во время обработки, поскольку это существенно влияет на срок службы инструмента и общую производительность обработки. **Цель работы:** исследовать температуру на поверхности раздела стружка–инструмент с учетом влияния параметров резания и типа покрытия инструмента при точении SS304. Температура на границе раздела стружка–инструмент измеряется путем изменения скорости резания и подачи при постоянной глубине резания твердосплавными инструментами без покрытия; с однослойным покрытием TiAlN и многослойным покрытием TiN/TiAlN, нанесенными методом осаждения паров (PVD). Кроме того, предпринята попытка разработать модель для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент с использованием размерного анализа и моделирования на основе ИНС для лучшего понимания процесса. **Методы исследования.** Эксперименты проводили при изменении скорости резания (140...260 м/мин) и подачи (0,08...0,2 мм/об), но при сохранении постоянной глубины резания, равной 1 мм. Температуру на границе раздела стружка–инструмент измеряли с использованием принципа термомпары для обработки инструмента. **Калибровочная установка (Calibration Setup)** предназначена для установления взаимосвязи между создаваемой электродвижущей силой (ЭДС) и температурой резания во время обработки. Для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент был проведен статистический размерный анализ и построена модель на основе искусственных нейронных сетей. Тангенциальная сила резания и характеристики стружки, такие как ширина и толщина, также измерялись при различных условиях резания, что является необходимым при моделировании размерного анализа. **Результаты и их обсуждение.** Твердосплавный инструмент с PVD-покрытием из TiAlN имел более низкую температуру на границе раздела стружка–инструмент, чем инструмент с покрытием из TiN/TiAlN. Было замечено, что температура на границе раздела стружка–инструмент заметно возрастает с увеличением скорости резания, площадью поперечного сечения стружки и удельного давления резания. Однако меньшая сила резания наблюдалась при использовании твердосплавного инструмента с многослойным покрытием TiN/TiAlN, что можно объяснить более низким коэффициентом трения, создаваемым передней поверхностью этого инструмента для стекающей стружки. Вместе с тем наибольшая сила резания наблюдалась при использовании твердосплавного инструмента без покрытия. Было отмечено, что разработанные модели позволяют прогнозировать температуру на границе стружка–инструмент с абсолютной погрешностью 5 %. Однако наименьшая средняя абсолютная погрешность в 0,78 % наблюдалась в модели, построенной с использованием ИНС и, следовательно, может быть надежно использована для прогнозирования температуры интерфейса стружка–инструмент во время точения SS304.

**Для цитирования:** Кулкарни А.П., Чинчаникар С., Саргаде В.Г. Теория размерностей и моделирование температуры на границе раздела стружка–инструмент при точении SS304 на основе искусственных нейронных сетей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 47–64. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-47-64.

#### \*Адрес для переписки

Чинчаникар Сатиш, к.т.н., профессор

Институт информационных технологий Вишвакармы,

Кондва (Бадрек), Пуне - 411048, Махараштра, Индия

Тел.: 91-2026950441, e-mail: [satish.chinchaniкар@viit.ac.in](mailto:satish.chinchaniкар@viit.ac.in)

## Введение

Аустенитная нержавеющая сталь – наиболее часто используемая немагнитная сталь, относится к категории труднообрабатываемых материалов. Это связано с тенденцией к образованию длинной, липкой и волокнистой стружки, а также к образованию наростов во время обработки резанием, что снижает стойкость инструмента и снижает качество обработки поверхности. Выбор материала режущего инструмента, его геометрии и условий резания играет важную роль при обработке этих сталей.

Исследователи наблюдали более высокую температуру поверхности раздела стружка–инструмент при использовании инструментов без покрытия, с покрытием из  $\text{TiC/TiN}$  и  $\text{TiC/Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ . Было замечено, что температура поверхности раздела быстро возрастает с увеличением подачи и скорости резания. Однако повышение температуры резания ускоряет износ инструмента и существенно влияет на его стойкость [1, 2]. *Pal* с соавторами [3] разработали математическую модель для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент. Их исследование показало, что скорость и глубина резания в наибольшей степени определяли температуру поверхности раздела. *Abhang* с соавторами [4] обнаружили термоэлектрическую взаимосвязь между режущим инструментом и рабочим материалом. Их исследование показало, что скорость резания и подача оказывают заметное влияние на температуру резания во время токарной обработки стали *EN-31*.

*Alvelid* [5] использовал принцип метода инструментальной термопары. Автор выполнил калибровку, используя прямой нагрев калибровочного материала с помощью электрического тока через резистивный элемент или индукционную катушку, которые были помещены напротив точки контакта двух материалов. Его исследование показало, что термоэлектрический потенциал существенно зависит от скорости нагрева и охлаждения. *Chinchanikar* и *Choudhury* [6] также разработали математическую модель для прогнозирования средней температуры на границе раздела стружка–инструмент на основе экспериментальных наблюдений. Их исследование коррелировало ЭДС (электродвижущую силу) с температурой на поверхности раздела, основан-

ную на принципе инструментальной термопары, а также показало, что скорость резания, подача и глубина резания практически не влияют на температуру поверхности раздела. В другом исследовании [7] они обнаружили более высокую температуру поверхности раздела для более твердого рабочего материала, чем для мягкого.

*Panneerselvam* с соавторами [8] исследовали температуру границы раздела стружки и инструмента для режущих инструментов, изготовленных методом порошковой металлургии. Их исследование показало, что скорость резания существенно влияет на температуру поверхности раздела. *Bapat* с соавторами [9] разработали численную модель, позволяющую получить распределение температуры при точении закаленной стали *AISI 52100*. Модель распределения температуры как функция тепловыделения была разработана с использованием модуля *ABAQUS explicit* и с произвольным лагранжево–эйлеровым (*ALE*) подходом. Было доказано, что температура резания увеличивается с увеличением скорости резания. Результаты моделирования распределения температуры соответствовали результатам, имеющимся в литературе.

*Dhar* с соавторами [10] сообщили о быстром повышении шероховатости поверхности из-за роста температуры резания и напряжения на вершине инструмента. Инструментальная термопара использовалась для измерения температуры на границе раздела стружка–инструмент. *Anagonye* с соавторами [11] выполнили калибровку инструмента и рабочих материалов с кислородно-ацетиленовой горелкой, которая использовалась в качестве источника нагрева при реализации принципа на основе инструментальной термопары. В их исследовании наблюдалось снижение температуры резания при увеличении угла наклона и радиуса при вершине пластины из-за наличия большей площади для отвода тепла.

Из рассмотренной выше литературы следует, что параметры резания, особенно скорость резания и подача, существенно влияют на температуру поверхности раздела стружка–инструмент. В большинстве исследований были предприняты попытки измерить температуру резания во время обработки с использованием метода инструментальной термопары. Однако очень мало работ по исследованию температуры резания с

учетом влияния параметров резания и типа покрытия инструмента при точении *SS304*. Более того, очень мало попыток моделирования температуры резания с использованием анализа размерностей и искусственных нейронных сетей. В соответствии с вышеуказанными фактами в настоящей работе исследуется температура на границе раздела стружка–инструмент во время токарной обработки *SS304* твердосплавными инструментами без покрытия, а также с однослойными TiAlN и многослойным TiN/TiAlN PVD-покрытиями. Кроме того, чтобы лучше понять процесс, была предпринята попытка разработать модель для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент с использованием анализа размерностей и моделирования на основе искусственных нейронных сетей.

### Методика исследований

В настоящей работе температура поверхности раздела стружка–инструмент была исследована во время токарной обработки заготовки из нержавеющей стали *SS304* диаметром 90 мм и длиной 300 мм с использованием твердосплавных инструментов без покрытия, а также с TiAlN и TiN/TiAlN PVD-покрытиями. Технические характеристики ISO пластины без покрытия и державки, использованные в настоящем исследовании, приведены в табл. 1. Радиус при вершине

выбранной режущей пластины составил 0,8 мм, а радиус кромки пластины – приблизительно 20 мкм. Токарные эксперименты проводились на токарном станке с ЧПУ. Температура поверхности раздела стружка–инструмент была исследована при сухом точении при скоростях резания 140, 200 и 240 м/мин, подаче 0,08; 0,14; 0,2 и 0,26 мм/об и постоянной глубине резания 1 мм. Параметры резания были выбраны на основе обзора литературы, возможностей станка и рекомендаций производителя режущего инструмента.

При механической обработке возникающая температура имеет более обширное и критическое влияние на производительность обработки. Во время обработки потребляемая мощность в основном преобразуется в тепло вблизи режущей кромки инструмента, и почти вся работа, выполняемая во время пластической деформации, преобразуется в тепло. В настоящем исследовании закон принципа термоэлектричества (эффекта Зеебека) был использован для корреляции разницы температур между горячим и холодным спаем двух разнородных материалов с генерируемой электродвижущей силой (ЭДС). Однако присутствие третьего материала было бы нежелательным, так как он может изменить конечный результат из-за образования паразитной ЭДС на втором переходе. Поскольку это изменяет конечный результат, необходимо принять

Таблица 1

Table 1

#### Технические характеристики ISO пластины и державки

##### The ISO specifications of cutting insert and tool holder

Характеристика / Particulars	Значение / Details
Обозначение режущей пластины по стандарту ISO / ISO designation of cutting insert	CNMG120408 (MG-MS)
Прилежащий угол (угол профиля) / Including angle	80°
Передний угол / Rake angle	–6°
Задний угол / Clearance angle	5°
Угол в плане / Approach angle	95°
Обозначение державки по стандарту ISO / ISO designation of tool holder	PCLNL2525M12



меры для его устранения. Поэтому изоляция материала заготовки/инструмента играет важную роль в получении точных результатов с помощью метода инструментальной термопары.

Изначально заготовка зажималась с помощью патрона и поддерживалась центром задней бабки во время обработки. Поэтому были приняты меры для того, чтобы изолировать заготовку от кулачков патрона. Заготовка была изолирована с помощью специальной тефлоновой ленты и втулки, как показано на рис. 1. Кроме того, давление зажимных губок было отрегулировано и поддерживалось на оптимальном уровне для предотвращения проникновения губок через изоляцию. После изоляции заготовки с одного конца, т. е. от патрона, необходимо было изолировать заготовку от задней бабки, чтобы полностью изолировать заготовку от корпуса станка. В связи с этим вращающийся центр был покрыт эпоксидным гелевым покрытием и использованы тефлоновые изоляционные заглушки (заглушки из непроводящего материала). Поскольку державка находится в прямом контакте с револьверной головкой и в конечном итоге с корпусом станка, на различные части державки, которые непосредственно контактируют с режущим инструментом (регулирующая шайба, L-образный рычаг, уплотняющая пластинка и корпус хвостовика) было нанесено эпоксидно-полиэфирное покрытие толщиной 20 мкм.

Соединение инструмента и детали во время обработки рассматривалось как горячий спай, в то время как угольная щетка, касавшаяся детали, отождествляла холодный спай, как показано на рис. 2. Соединительные провода от инструмента были выведены через небольшое отверстие, предусмотренное на хвостовике державки. Угольная щетка использовалась для подключения проводов вращающейся детали. Специальная подставка и подпружиненный держатель были спроектированы и изготовлены для поддержания равномерного и прочного контакта между угольной щеткой и заготовкой, как показано на рис. 2.

Один конец медной проволоки помещали между режущей пластиной и державкой, а другой конец подсоединяли к вольтметру. Один дополнительный медный провод использовался для замыкания электрической цепи. Один конец провода был прикреплен к угольной щетке, а другой – к вольтметру. Для соединения использовалась медная проволока диаметром 1 мм, и ее длина поддерживалась постоянной во время экспериментов и калибровки.

Калибровочная установка была разработана для установления взаимосвязи между производимой ЭДС и температурой резания во время обработки. Спай инструментальной термопары был построен с использованием длинной непрерывной стружки и пластины из карбида

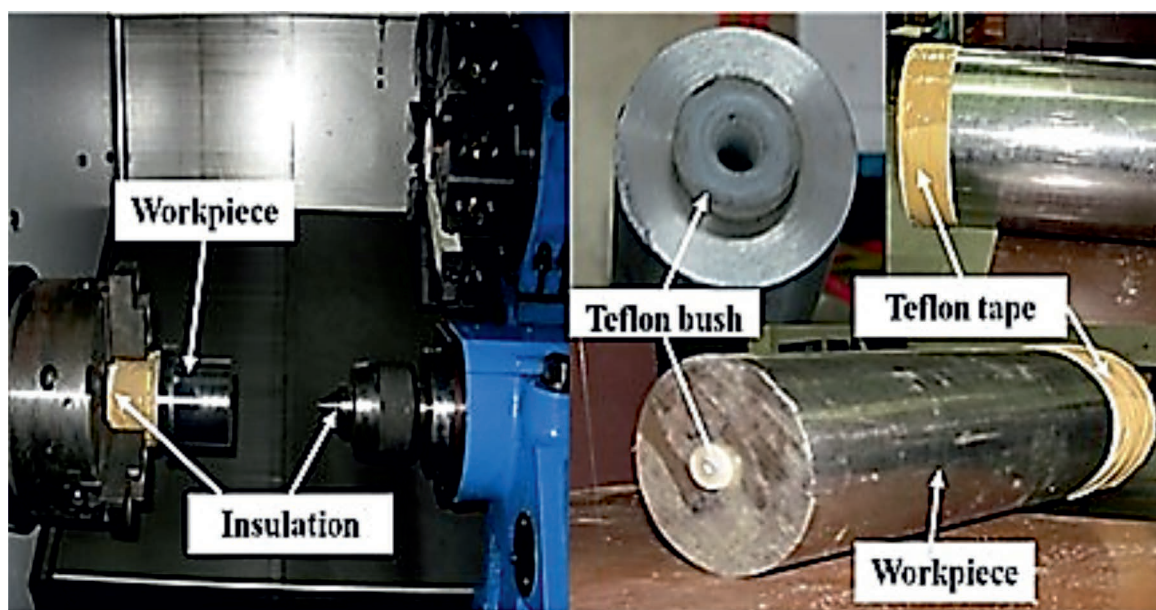


Рис. 1. Изоляция заготовки вставленными заглушками

Fig. 1. Insulation of the workpiece with the inserted plugs

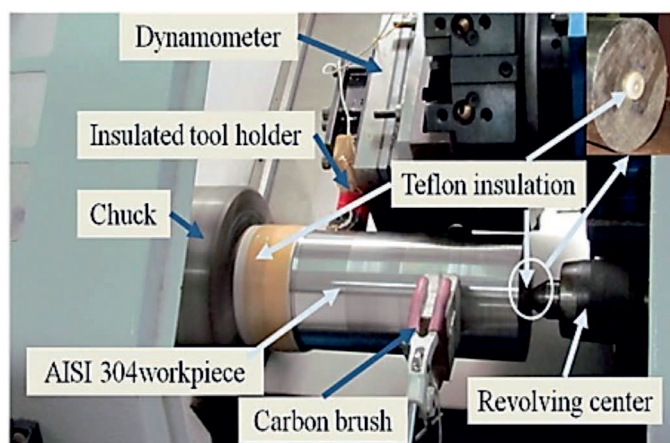


Рис. 2. Установка с инструментальной термопарой

Fig. 2. Tool-work thermocouple machining setup

вольфрама. Электрический воздушнонагреватель использовался в качестве нагревательного элемента для соединения рабочего инструмента. Он имитировал тепловые явления при механической обработке. В литературе сообщается, что температура калибровки должна быть больше половины точки плавления рабочего материала (температура плавления *SS304*: 1453 °C) [1, 2]. Поэтому был выбран электрический воздушнонагреватель из материала инконель мощностью 2 кВт, который может создавать температуру 1000 °C в раскаленных условиях. На стыке заготовки и вставки устанавливалась стандартная проволока для термопары алюмель-хромель.

Для калибровки температуры на границе раздела стружка–инструмент калибруемый материал заготовки и инструмента сначала зажимался для обеспечения надлежащего контакта между ними. Затем один конец медного провода подсоединяли к инструменту и заготовке, а другой конец – к клеммам вольтметра. Далее электрический воздушнонагреватель был приведен в контакт с точкой соединения для нагрева этой самой точки. Стандартная термопара типа К (хромель–алюмель) удерживалась на стыке рабочего инструмента и подключалась к индикатору температуры. Вся сборка размещалась в контейнере, изолированном стекловолокном для уменьшения тепловых потерь. После включения электрического нагревателя происходил постепенный нагрев точки соединения до 1000 °C с одновременной регистрацией соответствующей ЭДС. Калибровочная кривая для комбинации твердосплавных инструментов без

покрытия, а также с TiAlN и TiN/TiAlN *PVD*-покрытиями и рабочего материала *SS304* показана на рис. 3.

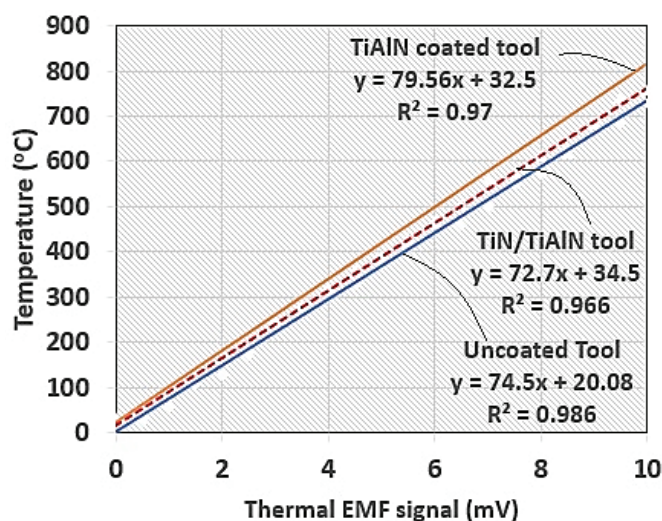


Рис. 3. Калибровочная кривая для инструментов без покрытия, а также с TiAlN и TiN/TiAlN *PVD*-покрытиями

Fig. 3. Calibration curves for uncoated and *PVD* single-layer TiAlN and multi-layer TiN/TiAlN coated carbide tools

## Результаты и их обсуждение

Большое количество исследований во всем мире направлены на улучшение обрабатываемости *SS304*. В табл. 2 показаны экспериментальные результаты измерения температур резания во время сухого точения стали *SS304* инструментами без покрытия, а также с TiAlN и TiN/TiAlN *PVD*-покрытиями при различных режимах резания. На рис. 4 показано влияние скорости резания и подачи на температуру резания твердосплавными инструментами без покрытия, а также с TiAlN и TiN/TiAlN *PVD*-покрытиями.

В последние годы исследователи уделяют значительное внимание разработке прогнозных моделей для измерения производительности во время обработки. В настоящей работе для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент разработаны модели на основе статистического анализа, анализа размерностей и искусственной нейронной сети. Графики поверхности построены для лучшего понимания влияния параметров процесса на температуру резания. Значения коэффициентов, задействованных в статистических моделях для различных инструментов, были рассчитаны



**Изменение температуры резания для различных инструментов  
в зависимости от условий резания**  
**Cutting temperature for different tools varying with cutting conditions**

Эксперимент № / Expt. no.	Скорость резания (м/мин) / Cutting speed (m/min)	Подача (мм/об) / Feed (mm/rev)	Температура на границе раздела стружка– инструмент / Chip-tool interface temperature		
			Пластина без покрытия / Uncoated	Пластина с TiAlN покрытием / TiAlN coated	Пластина с TiN/TiAlN покрытием / TiN/TiAlN coated
1	140	0,08	825	930	996
2	140	0,14	900	1039	1047
3	140	0,2	939	1041	1081
4	200	0,08	933	1109	1104
5	200	0,14	1029	1169	1161
6	200	0,2	1039	1200	1199
7	260	0,08	1078	1186	1191
8	260	0,14	1120	1204	1252
9	260	0,2	1175	1257	1293

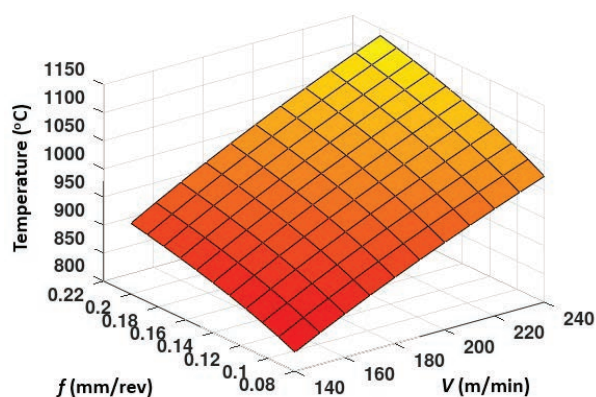
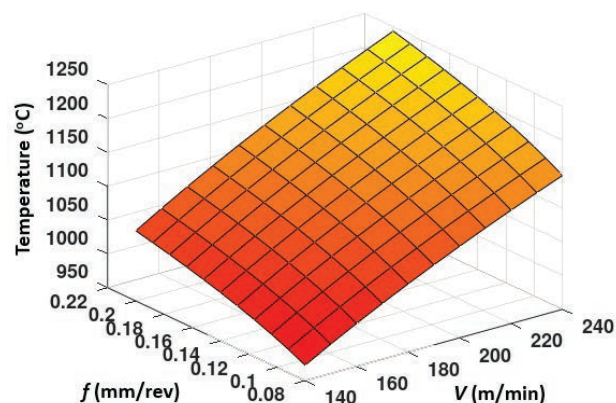
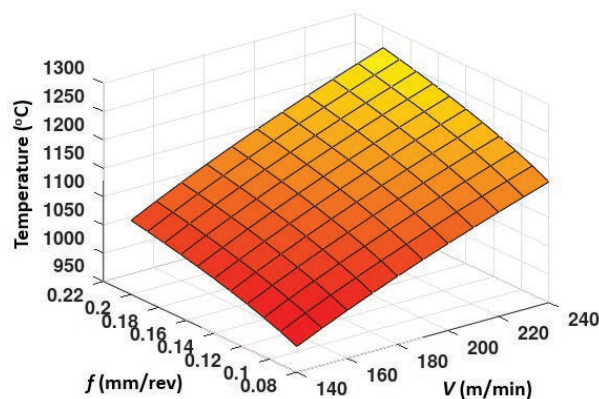

*a*

*б*

*в*

Рис. 4. Температура резания для инструмента без покрытия (*a*); для инструмента с TiAlN-покрытием (*б*); для инструмента с TiN/TiAlN-покрытием (*в*)

Fig. 4. Cutting temperature for (*a*) Uncoated; (*б*) TiAlN coated; (*в*) TiN/TiAlN coated tool

методом регрессии с использованием программного обеспечения *Data-fit*. Значения *R*-квадрата для всех разработанных статистических моделей выше 0,9 (табл. 3) показывают, что разработанные модели могут быть надежно использованы для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент во время токарной обработки *SS304* для данной комбинации инструмента и заготовки.

Чтобы иметь четкое представление о влиянии входных параметров на температуру резания, построены трехмерные (3D) поверхностные диаграммы путем изменения параметров процесса для инструментов без покрытия и с *PVD*-покрытием. Диаграммы построены с использованием разработанных эмпирических уравнений. На рис. 4 показаны трехмерные поверхностные диаграммы температуры резания во время токарной обработки *SS304* для различных инструментов, построенные с использованием формул (1)–(3).

Из рис. 4, *a*, *b* и *в* видно, что температура резания увеличивается с увеличением скорости резания и подачи. Повышение температуры резания более заметно при увеличении скорости резания, сопровождаемой подачей. Однако этот эффект проявляется в большей степени при использовании твердосплавного инструмента без покрытия, за которым следует твердосплавный инструмент с *TiAlN*-покрытием. Это также может быть подтверждено более высоким положительным значением экспоненты для скорости резания, за которым следует подача по формулам (1)–(3).

Самая низкая температура резания, наблюдаемая для твердосплавного инструмента без покрытия, показывает, что максимальное количество тепла проникало в режущий инструмент от передней поверхности. Однако более высокая температура поверхности раздела, наблюдаемая при использовании инструментов с покрытием, показывает, что покрытия способствуют меньшему проникновению тепла в основание инструмента. Вместе с тем среди инструментов с покрытием самая низкая температура поверхности раздела стружка–инструмент наблюдалась у твердосплавного инструмента с *TiAlN PVD*-покрытием, чем у инструмента с покрытием *TiN/TiAlN*. Это также может быть подтверждено более высоким значением теплопроводности твердосплавного инструмента без покрытия, за которым следует покрытие *TiAlN* и покрытие *TiN/TiAlN*. Теплопроводность инструмента без покрытия, а также с *TiAlN* и *TiN/TiAlN PVD*-покрытием составляет 80 Вт/м · К, 6,7 Вт/м · К и 5,1 Вт/м · К соответственно [12–14]. Несмотря на то что теплопроводность увеличивается в зависимости от температуры, при высоких температурах теплопроводность инструмента с покрытием остается ниже, чем у инструмента без покрытия [12]. Следовательно, тепло, проводимое в инструменте во время обработки твердосплавным инструментом без покрытия, больше по сравнению с инструментами с *TiAlN*- и *TiN/TiAlN*-покрытиями. Следовательно, температура твердосплавного инструмента без покрытия ниже, чем у инструмента с покрытием. Эти

Таблица 3

Table 3

**Статистические модели для прогнозирования температуры резания**  
**Statistical-based models to predict cutting temperature**

Тип инструмента / Type of tool	Статистические модели / Statistical-based models	<i>R</i> -квадрат / <i>R</i> -squared	Номер уравнения / Eq. no.
Твердосплавный без покрытия / Uncoated carbide	$T = 169,0517V^{0,3814} f^{0,01144}$	0,98	(1)
Твердосплавный с <i>TiAlN PVD</i> -покрытием / <i>PVD</i> -coated <i>TiAlN</i> carbide tool	$T = 265,5113V^{0,3074} f^{0,0874}$	0,93	(2)
Твердосплавный с <i>TiN/TiAlN PVD</i> -покрытием / <i>PVD</i> -coated <i>TiN/TiAlN</i> carbide tool	$T = 299,4988V^{0,2889} f^{0,0897}$	0,99	(3)

результаты соответствуют результатам, полученным Grzesik [4, 13, 15].

Повышение температуры резания, заметно увеличивающееся со скоростью резания, можно объяснить увеличением удельной энергии резания. Удельную энергию резания можно разделить на два основных компонента: энергию сдвига и энергию трения. Энергия сдвига и энергия трения прямо пропорциональны скорости сдвига и скорости стружки соответственно [16]. Следовательно, увеличение скорости резания напрямую отражается на увеличении энергии и, следовательно, температуры резания. Кроме того, было замечено, что структура покрытия в значительной степени влияет на температуру резания. Более того, было замечено, что инструмент без покрытия изнашивается быстрее по сравнению с инструментами с покрытием, в результате чего увеличивается площадь контакта стружки с инструментом, что приводит к большей проводимости тепла к области инструмента. В то же время в случае инструментов с покрытием более высокая износостойкость покрытий ограничивает износ и, следовательно, площадь контакта стружки с инструментом и позволяет отводить больше тепла со стекающей стружкой. Более высокая теплопроводность инструмента без покрытия снижает его жаропрочность, что приводит к более раннему выходу инструмента из строя [17].

Проблемы, связанные с измерением температуры, привели исследователей к разработке математических моделей для прогнозирования температур во время механической обработки. В ходе достаточно большого количества исследований была предпринята попытка предсказать температуру резания с использованием статистических моделей. Математические модели, разработанные Boothroyd, Shaw и Rapier, также широко использовались исследователями для прогнозирования температуры резания. В этом разделе обсуждается моделирование с использованием анализа размерностей и искусственной нейронной сети для прогнозирования температуры на поверхности раздела стружка–инструмент при работе с твердосплавными инструментами без покрытия, с однослойным TiAlN-покрытием и с многослойным TiN/TiAlN-покрытием.

### Анализ размерностей температуры резания

При анализе размерностей все независимые переменные записываются в виде их безразмерных комбинаций. Эти независимые безразмерные переменные могут быть определены на основе предварительных знаний, рассуждений или экспериментов. Значения констант получены из экспериментальных данных [18, 19]. В настоящей работе анализ размеров проводится для разработки математической модели с целью получения значений температуры резания во время токарной обработки стали SS304 с использованием инструментов без покрытия и инструментов с TiAlN-покрытием. Эти соотношения построены на основе экспериментальных данных. Физические величины, выбранные для анализа размеров, приведены в табл. 4.

Первоначально выбираются четыре часто используемых единицы:  $M$  (масса),  $L$  (длина),  $T$  (время) и  $\theta$  (температура). Это важный этап, на котором следует выбрать наиболее важные переменные, влияющие на температуру резания. Предполагалось, что около 80...85 % тепла рассеивается вместе со стружкой, и, следовательно, теплопроводность инструмента не включена в настоящий анализ. Переменные, выбранные для анализа, приведены в табл. 4. Количество основных величин – четыре, а количество физических величин, выбранных в настоящем исследовании, – шесть. Согласно пи-теореме Buckingham, количество безразмерных групп, необходимых для корреляции всех этих величин, будет равно разнице между количеством физических величин и фундаментальными величинами, которая равна двум в настоящем исследовании.

Затем четыре основные переменные из шести физических величин выбираются таким образом, чтобы они не образовывали сами по себе безразмерной группы. Эти переменные –  $V_c$ ,  $S_p$ ,  $k$  и  $\rho C$ . Одна неосновная величина группируется со всеми четырьмя основными переменными, чтобы получить одно безразмерное число. Пусть  $Q_1$  и  $Q_2$  – две безразмерные группы, которые выражаются следующим образом:

$$Q_1 = (V_c)^a (S_p)^b k^c (\rho C)^d \theta, \quad (4)$$

$$Q_2 = (V_c)^e (S_p)^f k^g (\rho C)^h A_0. \quad (5)$$



**Физические величины вместе с размерной формулой**  
**Physical quantities along with dimensional formula**

Физическая величина / Physical quantity	Обозначение / Symbol	Размерная формула / Dimensional formula
Температура (°C) / Temperature (degree Celsius)	$\Theta$	D
Скорость резания (м/мин) / Cutting speed (m/min)	$V_c$	$LT^{-1}$
Поперечное сечение стружки (м <sup>2</sup> ) / Chip cross-sectional area (m <sup>2</sup> )	$A_0$	$L^2$
Удельное давление резания (Н/м <sup>2</sup> ) / Specific cutting pressure (N/m <sup>2</sup> )	$S_p$	$ML^{-1}T^{-2}$
Теплопроводность рабочего материала (Вт/м · К) / Thermal conductivity of work material (W/m · K)	$k$	$MLT^{-3}D^{-1}$
Объемная удельная теплоемкость рабочего материала (произведение плотности ( $\rho$ ) на удельную теплоемкость рабочего материала ( $C$ )) ([кг/м <sup>3</sup> ][Дж/кг · К]) / Volumetric specific heat of work material (a product of density ( $\rho$ ) and specific heat of work material ( $C$ )) ([kg/m <sup>3</sup> ][J/kg · K])	$\rho C$	$ML^{-1}T^{-2}D^{-1}$

С точки зрения фундаментальных измерений уравнения (4) и (5) можно записать следующим образом:

$$Q_1 = (L^a T^{-a})(M^b L^{-b} T^{-2b})(M^c L^c T^{3c} D^{-c}) \times \\ \times (M^d L^{-d} T^{-2d} D^{-d}) D, \quad (6)$$

$$Q_2 = (L^e T^{-e})(M^f L^{-f} T^{-2f})(M^g L^g T^{3g} D^{-g}) \times \\ \times (M^h L^{-d-h} T^{-2h} D^{-h}) L^2. \quad (7)$$

Поскольку  $Q_1$  и  $Q_2$  являются безразмерными величинами, индекс для каждого члена должен быть равен нулю. Следовательно, приравнявая индекс для каждого члена к нулю и решая уравнения одновременно, мы получаем, что  $a = 0$ ,  $b = -1$ ,  $c = 0$ ,  $d = 1$ ,  $e = 2$ ,  $f = 0$ ,  $g = -2$  и  $h = 2$ . Подставляя эти значения констант в уравнения (6) и (7), получаем:

$$Q_1 = (\rho C \theta / S_p), \quad (8)$$

$$Q_2 = (V_c^2 (\rho C)^2 A_0) / k^2. \quad (9)$$

Выразим температуру на поверхности раздела стружка–инструмент как функцию двух безразмерных групп  $Q_1$  и  $Q_2$ , которые включают зависимую переменную  $\theta$ . Уравнение температуры резания с использованием анализа размерностей (уравнения (8) и (9)) может быть записано следующим образом:

$$\theta = C_0 (S_p / \rho C)^m \left( (V_c^2 (\rho C)^2 A_0) / k^2 \right)^n, \quad (10)$$

где  $C_0$ ,  $m$ ,  $n$  – константы, а их значения определены на основании экспериментальных результатов. Уравнение (10) можно использовать для определения температуры резания во время токарной обработки стали SS304 с использованием как пластин без покрытия, так и пластин с покрытием. Значения констант в формуле (10) получены с использованием экспериментальных результатов температуры резания (см. табл. 2) и знания силы резания, толщины стружки и ширины стружки для данных условий резания (табл. 5).

Объемная удельная теплоемкость рабочего материала ( $\rho C$ ) и теплопроводность ( $k$ ) рабочего материала (при 500 °C) упоминаются в

Таблица 5

Table 5

Сила резания, толщина стружки и ширина стружки при условиях резания, указанных в табл. 2

The cutting force, chip thickness, and chip width at cutting conditions stated in Table 2

Экспе- римент № / Expt. no.	Инструмент без покрытия / Uncoated tool			Инструмент с TiAlN- покрытием / TiAlN coated tool			Инструмент с TiN/TiAlN- покрытием / TiN/TiAlN coated tool		
	$F_c$ (Н)	$a_c$ (мм)	$a_w$ (мм)	$F_c$ (Н)	$a_c$ (мм)	$a_w$ (мм)	$F_c$ (Н)	$a_c$ (мм)	$a_w$ (мм)
1	410	0,287	1,64	354	0,3	1,5	329	0,24	1,47
2	630	0,370	1,86	536	0,32	1,8	460	0,3	1,73
3	702	0,480	1,9	610	0,35	1,83	570	0,37	1,77
4	387	0,260	1,72	318	0,28	1,663	321	0,22	1,59
5	554	0,360	1,87	498	0,3	1,76	448	0,28	1,72
6	636	0,473	1,92	582	0,33	1,83	555	0,35	1,78
7	365	0,200	1,87	366	0,27	1,646	315	0,19	1,66
8	501	0,330	1,86	512	0,29	1,733	440	0,26	1,7
9	630	0,467	1,92	556	0,315	1,84	545	0,34	1,78

литературе и рассматриваются как 502 Дж/кг · К и 21,5 Вт/м · К.  $A_0$  – это площадь поперечного сечения стружки, которая рассчитывается как произведение толщины стружки ( $a_c$ ) и ширины стружки ( $a_w$ ) для данных условий резания. Удельное давление резания ( $S_p$ ) получается делением силы резания ( $F_c$ ) на произведение подачи и глубины резания. Тангенциальное усилие резания ( $F_c$ ) измеряли измерителем силы резания типа *Kister-9257B*, а среднюю ширину стружки и толщину стружки – с помощью цифрового микрометра. Полученные значения констант:  $C_0 = 1,24$ ,  $m = 0,154$  и  $n = 0,226$  для твердосплавного инструмента без покрытия и  $C_0 = 1,97$  и 6,63,  $m = 0,083$  и 0,0432,  $n = 0,169$  и 0,1605 для твердосплавных инструментов с покрытием TiAlN и TiN/TiAlN соответственно. Подставив эти значения в уравнение (10) можно получить окончательные уравнения для прогнозирования температуры резания твердосплавными инструментами без покрытия, а также с TiAlN- и TiN/TiAlN-покрытиями соответственно:

для твердосплавного инструмента без покрытия,

$$\theta = 28,5636 S_p^{0,154} V^{0,452} A_0^{0,226}; \quad (11)$$

для твердосплавного инструмента с TiAlN-покрытием

$$\theta = 416,5528 S_p^{-0,083} V^{0,338} A_0^{0,169}; \quad (12)$$

для твердосплавного инструмента с TiN/TiAlN-покрытием

$$\theta = 167,9887 S_p^{0,0432} V^{0,321} A_0^{0,1605}. \quad (13)$$

Из показателей  $S_p$ ,  $V$  и  $A_0$  разработанных уравнений (11)–(13) видно, что температура на поверхности раздела стружка–инструмент больше зависит от скорости резания, за которой следуют площадь поперечного сечения стружки и удельное давление резания. Тем не менее эти параметры можно рассматривать как более заметно влияющие на температуру резания для твердосплавного инструмента без покрытия, за которым следует твердосплавный инструмент с однослойным TiAlN-покрытием и твердосплавный инструмент с многослойным TiN/TiAlN-покрытием. Температура на поверхности раздела стружка–инструмент для твердосплавных инструментов без покрытия, инструментов с однослойным TiAlN-покрытием и инструментов

с многослойным TiN/TiAlN-покрытием при различных режимах резания рассчитывается с использованием формул (11)–(13) соответственно и показана в табл. 6.

### Искусственная нейронная сеть

Искусственная нейронная сеть (ИНС) – это метод расчёта, который может моделировать отношения между входными и выходными параметрами. Существуют разные типы ИНС, однако наиболее часто используется многослойный персептрон (МП). Типичная архитектура МП, показанная на рис. 5, характеризуется тремя различными уровнями: входным слоем, скрытым слоем и выходным слоем, которые состоят из взаимосвязанной группы искусственных нейронов. Каждый нейрон в слое связан со всеми нейронами в соседних слоях. Количество нейронов, присутствующих во входном и выходном слое, равно количеству входных переменных и соответствующих выходных значений. Количество скрытых слоев и нейронов в этих слоях определяется пользователем.

Для более точного прогнозирования результатов важна тренировка или обучение разработанной сети. Процедура, используемая для выполнения процесса обучения, называется алгоритмом обучения, функция которого

заключается в упорядоченном изменении си-наптических весов сети для достижения желаемого результата. Существуют различные алгоритмы обучения нейронной сети. Одним из наиболее предпочтительных алгоритмов обучения является алгоритм обратного распространения ошибки. Для типичного алгоритма ИНС пусть  $x_1, x_2, \dots, x_n$  будут входными данными,  $y_1, y_2, \dots, y_n$  – желаемым выходом и  $o_1, o_2, \dots, o_k$  – выходом, полученным из выходного слоя сети, когда  $x_1, x_2, \dots, x_n$  представлено на входном слое. На первом этапе инициализируются веса и пороги. Затем выходной сигнал каждого нейрона  $f(wi)$  вычисляется из входных данных и инициализированных весов, что приводит к окончательному прогнозу выходных данных сети. Затем вычисляется ошибка на  $i$ -м выходном узле ( $o_i - y_i$ ). Кроме того, веса между скрытым слоем и выходным слоем изменяются на основе ошибки в каждом выходном узле, и веса в предыдущих слоях модифицируются ошибками обратного распространения, вычисленными в узлах выходного слоя [20]. Этот процесс повторяется для набора входных и выходных обучающих данных. Обучение останавливается, когда выход нейронной сети достаточно близок к желаемому выходу для каждого набора.

Таблица 6

Table 6

Температура на границе раздела стружка–инструмент с различными моделями и инструментами

### The chip-tool interface temperature with different models and tools

Эксп. № / Expt. no.	Инструмент без покрытия / Uncoated tool			Инструмент с TiAlN- покрытием / TiAlN coated tool			Инструмент с TiN/TiAlN- покрытием / TiN/TiAlN coated tool		
	CM	AP	ИНС	CM	AP	ИНС	CM	AP	ИНС
1	834	838	837	973	963	941	996	996	987
2	889	895	936	1021	1017	1027	1047	1049	1045
3	926	918	942	1054	1055	1041	1081	1082	1049
4	955	965	939	1085	1103	1099	1104	1114	1098
5	1019	1026	1037	1140	1137	1169	1161	1161	1172
6	1061	1061	1038	1176	1183	1217	1199	1203	1195
7	1056	1034	1078	1176	1182	1188	1191	1191	1195
8	1126	1114	1119	1235	1229	1210	1252	1245	1254
9	1173	1189	1178	1275	1288	1261	1293	1301	1275



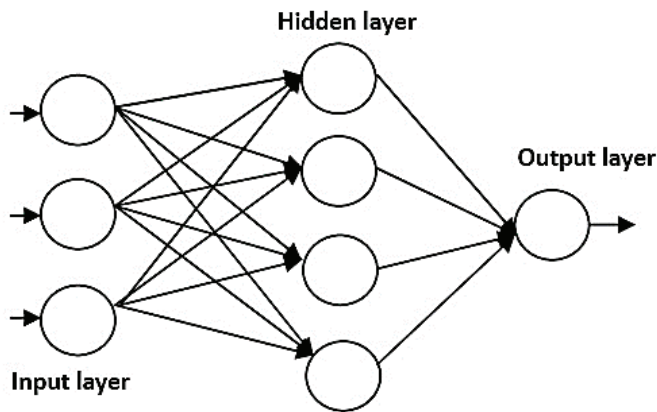


Рис. 5. Типичная архитектура ИНС

Fig. 5. Typical ANN architecture

Модель ИНС разработана для прогнозирования температуры на поверхности раздела стружка–инструмент с учетом входных параметров, таких как тип инструмента, скорость резания и подача, с использованием *MATLAB Toolbox*. Архитектура ИНС имеет три уровня: входной, выходной и скрытый, как показано на рис. 6. Входной слой имеет 3 нейрона, выходной слой – 1 нейрон, а скрытый слой – 8 нейронов. Нейронная сеть с прямой связью отображает набор данных числовых входов с набором числовых целей. Приложение *Neural Fitting* из *MATLAB Toolbox* поможет с выбором данных, а также с созданием и обучением сети, оценкой ее производительности с использованием среднеквадратичной ошибки и регрессионного анализа. В настоящем исследовании выбрана двухслойная сеть с прямой связью со скрытыми сигмовидными и линейными выходными нейронами, которые произвольно хорошо подходят для многомерных задач, при этом учитываются согласованные

данные и достаточное количество нейронов в ее скрытом слое. Сеть была обучена с помощью алгоритма обратного распространения ошибки *Левенберга–Марквардта* (*Levenberg–Marquardt*).

В нейронной сети для обучения и проверки тестовых данных используются три вида выборок. В настоящей работе около 70 % данных (экспериментальные результаты измерения температуры режущего инструмента) используется для обучения нейронной сети. Сеть настраивается по своей погрешности. Около 15 % данных используется для проверки результатов, предсказываемых обученной нейронной сетью. Эти наборы данных проверки применяют для измерения обобщения сети и для остановки обучения, когда обобщение перестает улучшаться, около 15 % данных используется для проверки результатов, предсказываемых нейронной сетью. Эти наборы данных не влияют на обучение и поэтому обеспечивают независимую оценку производительности сети во время и после обучения.

Следующим важным шагом является определение сетевой архитектуры, т. е. установка количества нейронов в скрытом слое подходящей сети. Нейроны в скрытом слое выбираются путем проверки точности сети. Количество нейронов на скрытом слое можно изменить, если сеть не работает должным образом после обучения. В настоящем исследовании нейронная сеть моделируется с учетом другого количества скрытых нейронов для получения большей точности предсказанных результатов: наибольшая точность предсказания (0,995) наблюдалась с 8 нейронами на скрытом слое. Кроме того, сеть должна быть обучена с использованием алгоритма *Левенберга–Марквардта*, байесовской регу-

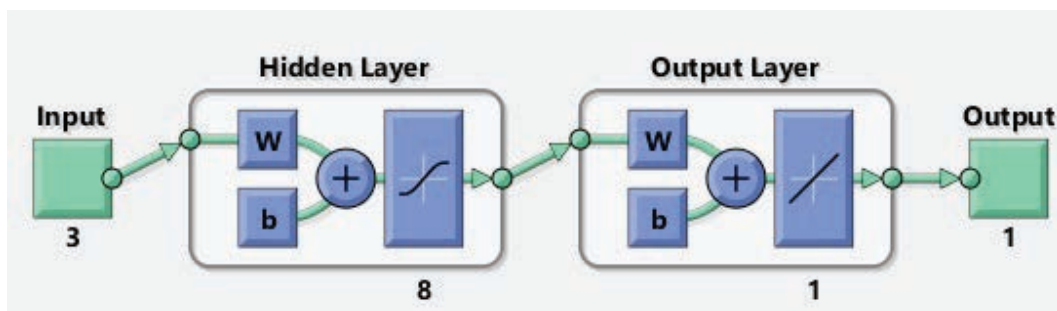


Рис. 6. Архитектура ИНС для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент

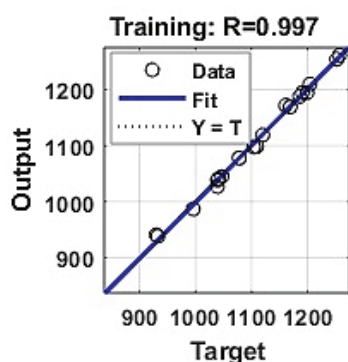
Fig. 6. ANN architecture to predict chip-tool interface temperature

ляризации или алгоритма масштабированного сопряженного градиента. Алгоритм байесовской регуляризации предпочтительнее для небольших и зашумленных наборов данных. Этот алгоритм дает хорошее обобщение, но требует больше времени. Алгоритм масштабированного сопряженного градиента требует меньше памяти и автоматически останавливается, когда обобщение перестает улучшаться. Однако исследователи в основном использовали алгоритм *Левенберга–Марквардта* для обучения нейронной сети. Этот алгоритм сравнительно быстрее других алгоритмов. Однако он требует больше памяти, и обучение автоматически останавливается, когда обобщение перестает улучшаться, на что указывает увеличение среднеквадратичной ошибки выборок проверки.

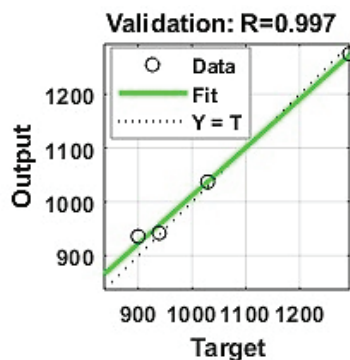
Эффективность обучения нейронной сети измеряется с помощью среднеквадратичной ошибки, которая представляет собой среднеквадратичную разницу между выходными данными и

целями. Более низкие значения лучше, и в настоящей работе лучшая эффективность проверки 417,9654 наблюдалась в периоде 7. Значения регрессии ( $R$ ) измеряют корреляцию между выходными данными (прогнозируемыми значениями) и целевыми значениями (входными данными). Графики регрессии нейронной сети с коэффициентами регрессии, полученные при обучении модели, проверке, тестировании и для всего набора данных, показаны на рис. 7, а, б, в и г соответственно.

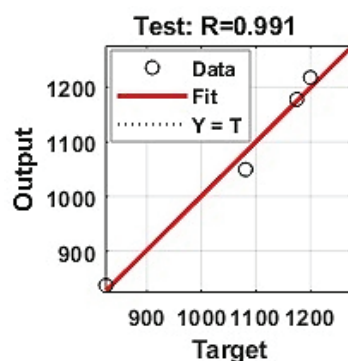
Значения коэффициентов регрессии, близкие к единице для обучения, проверки, тестирования и для всего набора данных, показывают, что разработанная модель нейронной сети может быть надежно использована для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент во время токарной обработки стали *SS304* для данной пары «инструмент–заготовка». Результаты, предсказанные нейронной сетью, показаны в табл. 6.



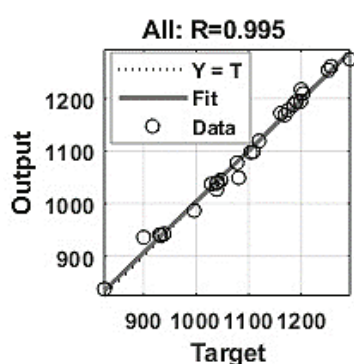
а



б



в



г

Рис. 7. Нейронная сеть:

а – обучение; б – проверка; в – тестирование; г – весь набор данных

Fig. 7. Neural network:

а – training; б – validation; в – test, г – all data set

### Сравнительная оценка

В этом разделе представлена сравнительная оценка точности прогнозируемых результатов температуры на границе раздела стружка–инструмент со статистической моделью (СМ), подходом анализа размерностей (АР) и искусственной нейронной сетью (ИНС). Точность различных моделей оценивается путем получения процента ошибки между прогнозируемыми и экспериментальными значениями температуры на поверхности раздела стружка–инструмент при различных режимах резания. В табл. 6 представлены результаты, предсказанные разработанными моделями температуры на границе раздела стружка–инструмент для различных инструментов. Прогнозируемые результаты хорошо согласуются с экспериментальными (см. табл. 2) с абсолютной погрешностью менее 5 %. Однако результаты, предсказанные моделью ИНС, лучше согласуются с экспериментальными результатами по сравнению с моделями, основанными на статистическом и размерном анализе.

Было замечено, что на температуру на границе раздела стружка–инструмент сильнее влияет скорость резания, за которой следуют площадь поперечного сечения стружки и удельное давление резания. С увеличением скорости резания увеличивается потребность в энергии резания, что приводит к высокой температуре резания. Теплопроводность режущего инструмента также имеет большое влияние на температуру на границе раздела стружка–инструмент. При работе с инструментом без покрытия была зафиксирована самая низкая температура резания. Это может быть связано с его более высокой теплопроводностью и большой площадью износа инструмента во время обработки, что приводит к быстрому рассеиванию тепла на границе раздела в инструменте.

Более низкая температура резания, характерная в большей степени для инструмента с однослойным TiAlN-покрытием, чем для инструмента с многослойным TiN/TiAlN-покрытием, может быть объяснена его более высокой теплопроводностью, чем эквивалентная теплопроводность инструмента с TiN/TiAlN-покрытием. Более низкая теплопроводность инструмента с TiN/TiAlN-покрытием препятствует передаче

тепла, что приводит к повышению температуры на передней поверхности. Инструмент с таким покрытием также показал более высокую температуру резания, чем пластины с AlTiCrN- и AlTiN-покрытиями [21]. Однако более высокая температура резания многослойным инструментом помогает сделать обрабатываемый материал сравнительно мягким и, следовательно, может помочь в повышении производительности обработки. Меньшее усилие резания наблюдалось при использовании твердосплавного инструмента с многослойным TiN/TiAlN-покрытием. Это может быть связано с более низким коэффициентом трения, обеспечиваемым многослойной передней поверхностью инструмента для стекающей стружки, что находит подтверждение на задней поверхности стружки. Вместе с тем наибольшая сила резания наблюдалась у твердосплавных инструментов без покрытия. В настоящем исследовании делается вывод о том, что при точении сплава SS304 твердосплавными инструментами с однослойным TiAlN- и многослойным TiN/TiAlN-покрытиями требуется сравнительная оценка производительности обработки с точки зрения стойкости инструмента, механизмов износа инструмента, шероховатости поверхности и т. д.

### Выводы

Эксперименты по токарной обработке аустенитной нержавеющей стали SS304 проводились с использованием твердосплавных инструментов без покрытия, а также с однослойным TiAlN и многослойным TiN/TiAlN PVD-покрытиями. Для измерения температуры резания использовался классический принцип инструментальной термопары. Температура на границе раздела стружка–инструмент была исследована с помощью статистического размерного анализа, а также модели искусственной нейронной сети. В результате можно сделать следующие выводы.

- Было замечено, что на температуру на границе раздела стружка–инструмент в большей степени влияет скорость резания, затем площадь поперечного сечения стружки и удельное давление резания. Инструмент без покрытия показал самую низкую температуру резания из-за его более высокой теплопроводности и большой площади износа инструмента во время обработки,



что привело к быстрому отведению тепла на границе раздела в инструмент.

- Для инструмента с однослойным TiAlN-покрытием наблюдалась более низкая температура резания, чем для инструмента с многослойным TiN/TiAlN-покрытием. Это можно объяснить его более высокой теплопроводностью. Однако при использовании твердосплавного инструмента с многослойным TiN/TiAlN-покрытием наблюдалось меньшее усилие резания, что можно связать с более низким коэффициентом трения, создаваемым передней поверхностью этого инструмента для стекающей стружки. С другой стороны, наибольшая сила резания наблюдалась у твердосплавных инструментов без покрытия.

- Результаты, предсказанные всеми разработанными моделями для температуры на границе раздела стружка–инструмент для различных инструментов, хорошо согласуются с экспериментальными результатами с абсолютной погрешностью менее 5 %. Тем не менее результаты, предсказанные моделью ИНС, лучше согласуются с экспериментальными результатами по сравнению с моделями, основанными на статистическом и размерном анализе, и, следовательно, разработанная модель ИНС может быть надежно использована для прогнозирования температуры на границе раздела стружка–инструмент во время токарной обработки сплава SS304.

### Список литературы

1. *Grzesik W.* Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1999. – Vol. 39, iss. 3. – P. 355–369. – DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00044-3.

2. *Grzesik W.* The role of coatings in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1998. – Vol. 79, iss. 1–3. – P. 133–143. – DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00491-3.

3. *Pal A., Choudhury S.K., Chinchaniar S.* Machinability assessment through experimental investigation during hard and soft turning of hardened steel // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol. 6. – P. 80–91. – DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.010.

4. *Abhang L.B., Hameedullah M.* Chip-tool interface temperature prediction model for turning process // *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2010. – Vol. 2, iss. 4. – P. 382–393.

5. *Alvelid B.* Cutting temperature thermo-electrical measurements // *Annals of CIRP*. – 1970. – Vol. 18. – P. 547–554.

6. *Chinchaniar S., Choudhury S.K.* Evaluation of chip-tool interface temperature: effect of tool coating and cutting parameters during turning hardened AISI 4340 steel // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol. 6. – P. 996–1005. – DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.170.

7. *Chinchaniar S., Choudhury S.K., Kulkarni A.P.* Investigation of chip-tool interface temperature during turning of hardened AISI 4340 alloy steel using multi-layer coated carbide inserts // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 701. – P. 354–358. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.701.354.

8. Effects of working parameters on performance characteristics of cutting tools processed through powder metallurgy under turning operation / T. Panneerselvam, T.K. Kandavel, S.A. Sreenivas, S. Karthik, M.M. Andru // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2021. – Vol. 30, iss. 4. – P. 2890–2898. – DOI: 10.1007/s11665-021-05622-6.

9. A numerical model to obtain temperature distribution during hard turning of AISI 52100 steel / P.S. Bapat, P.D. Dhikale, S.M. Shinde, A.P. Kulkarni, S.S. Chinchaniar // *Materials Today: Proceedings*. – 2015. – Vol. 2, iss. 4–5. – P. 907–914. – DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.150.

10. *Dhar N.R., Ahmed M.T., Islam S.* An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47, iss. 5. – P. 748–753. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.017.

11. *Anagonye A.U., Stephenson D.A.* Modeling cutting temperatures for turning inserts with various tool geometries and materials // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2002. – Vol. 124, iss. 3. – P. 544–552. – DOI: 10.1115/1.1461838.

12. Modern coatings in high performance cutting applications / W. Kalss, A. Reiter, V. Derflinger, C. Gey, J.L. Endrino // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2006. – Vol. 24, iss. 5. – P. 399–404. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2005.11.005.

13. *Grzesik W., Nieslony P.* Coupled thermo-mechanical FEM-based modelling of the tool-chip contact behaviour for coated cutting tools // *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. – 2012. – Vol. 11, iss. 1. – P. 20–35. – DOI: 10.1504/IJMMM.2012.044920.

14. *Jiang F., Yan L., Rong Y.* Orthogonal cutting of hardened AISI D2 steel with TiAlN-coated inserts – simulations and experiments // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 64. – P. 1555–1563. – DOI: 10.1007/s00170-012-4122-3.

15. *Grzesik W., Nieslony P.* Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating-chip interface // *Wear*. – 2004. – Vol. 256, iss. 1–2. – P. 108–117. – DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00390-9.
16. *Knight W.A., Boothroyd G.* Fundamentals of metal machining and machine tools. – CRC Press, 2005. – 602 p. – ISBN 9781138502246.
17. *Whitney E.D.* Ceramic cutting tools: materials, development and performance. – William Andrew, 2012. – 381 p. – ISBN 9780815516316.
18. *Drucker D.C., Ekstein H.* A dimensional analysis of metal cutting // *Journal of Applied Physics*. – 1950. – Vol. 21, no. 2. – P. 104–107. – DOI: 10.1063/1.1699607.
19. *Sekulic S.* Investigation of tangential forces in metal cutting by dimensional analysis // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. – 1976. – Vol. 20, no. 2. – P. 55–64.
20. *Naderpour H., Kheyroddin A., Amiri G.G.* Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks // *Composite Structures*. – 2010. – Vol. 92, no. 12. – P. 2817–2829. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.04.008.
21. *Kulkarni A.P., Sargade V.G.* Characterization and performance of AlTiN, AlTiCrN, TiN/TiAlN PVD coated carbide tools while turning SS 304 // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2015. – Vol. 30, no. 6. – P. 748–755. – DOI: 10.1080/10426914.2014.984217.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

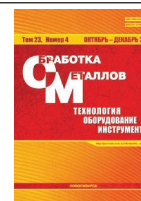
© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Dimensional analysis and ANN simulation of chip-tool interface temperature during turning SS304

Atul Kulkarni<sup>1,a</sup>, Satish Chinchani<sup>1,b,\*</sup>, Vikas Sargade<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> Vishwakarma Institute of Information Technology, Survey No. 3/4, Kondhwa (Budruk), Pune - 411048, Maharashtra, India

<sup>2</sup> Dr. Babasaheb Ambedkar Technological University, Vidyavihar, Lonere, Dist. Raigad - 402103, Maharashtra, India

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6452-6349>, [atul.kulkarni@viit.ac.in](mailto:atul.kulkarni@viit.ac.in), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, [satish.chinchani@viit.ac.in](mailto:satish.chinchani@viit.ac.in),

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8855-112X>, [vgsargade@dbtu.ac.in](mailto:vgsargade@dbtu.ac.in)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 29 July 2021

Revised: 19 August 2021

Accepted: 07 September 2021

Available online: 15 December 2021

##### Keywords:

Chip-tool interface temperature

Dimensional analysis

Artificial neural network

Coated tools

SS304

#### ABSTRACT

**Introduction.** During machining, the resulting temperature has a wider and more critical impact on machining performance. During machining, the power consumption is mainly converted into heat near the cutting edge of the tool. Almost all the work performed during plastic deformation turns into heat. Researchers have put a lot of effort into measuring the cutting temperature during machining, as it significantly affects tool life and overall machining performance. **The purpose of the work:** to investigate the temperature of the chip-tool interface, taking into account the influence of cutting parameters and the type of tool coating during SS304 turning. The chip-tool interface temperature is measured by changing the cutting speed and feed with a constant cutting depth for uncoated and PVD single-layer TiAlN and multi-layer TiN/TiAlN coated carbide tools. In addition, an attempt is made to develop a model for predicting the temperature of the chip-tool interface using dimensional analysis and ANN simulating to better understand the process. **The methods of investigation.** Experiments are carried out with varying the cutting speed (140–260 m/min), feed (0.08–0.2 mm/rev) and a constant cutting depth of 1 mm. The chip-tool interface temperature is measured using the tool-work thermocouple principle. The Calibration Setup is designed to establish the relationship between the produced electromotive force (EMF) and the cutting temperature during machining. Statistical dimensional analysis and artificial neural network models have been developed to predict the temperature of the chip-tool interface. Tangential cutting force and chip attributes such as chip width and thickness are also measured depending on the cutting conditions, which is a prerequisite for dimensional analysis simulation. **Results and Discussion.** A tool made of TiAlN carbide with PVD coating had a lower temperature at the chip-tool interface than a tool with TiN/TiAlN coating. It has been observed that the chip-tool interface temperature increases prominently with the cutting speed, followed by the chip cross-sectional area and the specific cutting pressure. However, a lower cutting force was observed when using a carbide tool with a multi-layer TiN/TiAlN coating, which can be attributed to a lower coefficient of friction created by the front surface of this tool for flowing chips. On the other hand, the greatest cutting force was observed in uncoated carbide tools. It was noticed that the developed models allow predicting the temperature of the chip-tool interface with an absolute error of 5%. However, the lowest average absolute error of 0.78% was observed with the ANN model and, therefore, can be reliably used to predict the chip-tool interface temperature during SS304 turning.

**For citation:** Kulkarni A.P., Chinchani S., Sargade V.G. Dimensional analysis and ANN simulation of chip-tool interface temperature during turning SS304. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 47–64. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-47-64. (In Russian).

#### References

1. Grzesik W. Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, vol. 39, iss. 3, pp. 355–369. DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00044-3.
2. Grzesik W. The role of coatings in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, vol. 79, iss. 1–3, pp. 133–143. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00491-3.

#### \* Corresponding author

Chinchani Satish, Ph.D. (Engineering), Professor

Vishwakarma Institute of Information Technology,

Pune, Maharashtra, India

Tel.: 91-2026950441, e-mail: [satish.chinchani@viit.ac.in](mailto:satish.chinchani@viit.ac.in)



3. Pal A., Choudhury S.K., Chinchani S. Machinability assessment through experimental investigation during hard and soft turning of hardened steel. *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 6, pp. 80–91. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.010.
4. Abhang L.B., Hameedullah M. Chip-tool interface temperature prediction model for turning process. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, vol. 2, iss. 4, pp. 382–393.
5. Alvelid B. Cutting temperature thermo-electrical measurements. *Annals of CIRP*, 1970, vol. 18, pp. 547–554.
6. Chinchani S., Choudhury S.K. Evaluation of chip-tool interface temperature: effect of tool coating and cutting parameters during turning hardened AISI 4340 steel. *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 6, pp. 996–1005. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.170.
7. Chinchani S., Choudhury S.K., Kulkarni A.P. Investigation of chip-tool interface temperature during turning of hardened AISI 4340 alloy steel using multi-layer coated carbide inserts. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 701, pp. 354–358. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.701.354.
8. Panneerselvam T., Kandavel T.K., Sreenivas S.A., Karthik S., Andru M.M. Effects of working parameters on performance characteristics of cutting tools processed through powder metallurgy under turning operation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, vol. 30, iss. 4, pp. 2890–2898. DOI: 10.1007/s11665-021-05622-6.
9. Bapat P.S., Dhikale P.D., Shinde S.M., Kulkarni A.P., Chinchani S.S. A numerical model to obtain temperature distribution during hard turning of AISI 52100 steel. *Materials Today: Proceedings*, 2015, vol. 2, iss. 4–5, pp. 907–914. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.150.
10. Dhar N.R., Ahmed M.T., Islam S. An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, iss. 5, pp. 748–753. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.017.
11. Anagonye A.U., Stephenson D.A. Modeling cutting temperatures for turning inserts with various tool geometries and materials. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, vol. 124, iss. 3, pp. 544–552. DOI: 10.1115/1.1461838.
12. Kalss W., Reiter A., Derflinger V., Gey C., Endrino J.L. Modern coatings in high performance cutting applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2006, vol. 24, iss. 5, pp. 399–404. DOI: 10.1016/j.jrmmh.2005.11.005.
13. Grzesik W., Nieslony P. Coupled thermo-mechanical FEM-based modelling of the tool-chip contact behaviour for coated cutting tools. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2012, vol. 11, iss. 1, pp. 20–35. DOI: 10.1504/IJMMM.2012.044920.
14. Jiang F., Yan L., Rong Y. Orthogonal cutting of hardened AISI D2 steel with TiAlN-coated inserts – simulations and experiments. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 64, pp. 1555–1563. DOI: 10.1007/s00170-012-4122-3.
15. Grzesik W., Nieslony P. Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating-chip interface. *Wear*, 2004, vol. 256, iss. 1–2, pp. 108–117. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00390-9.
16. Knight W.A., Boothroyd G. *Fundamentals of metal machining and machine tools*. CRC Press, 2005. 602 p. ISBN 9781138502246.
17. Whitney E.D. *Ceramic cutting tools: materials, development and performance*. William Andrew, 2012. 381 p. ISBN 9780815516316.
18. Drucker D.C., Ekstein H. A dimensional analysis of metal cutting. *Journal of Applied Physics*, 1950, vol. 21, no. 2, pp. 104–107. DOI: 10.1063/1.1699607.
19. Sekulic S. Investigation of tangential forces in metal cutting by dimensional analysis. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 1976, vol. 20, no. 2, pp. 55–64.
20. Naderpour H., Kheyroddin A., Amiri G.G. Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks. *Composite Structures*, 2010, vol. 92, no. 12, pp. 2817–2829. DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.04.008.
21. Kulkarni A.P., Sargade V.G. Characterization and performance of AlTiN, AlTiCrN, TiN/TiAlN PVD coated carbide tools while turning SS 304. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, no. 6, pp. 748–755. DOI: 10.1080/10426914.2014.984217.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.