ВАН ЦЗЮНЬЦИН
Аспирант РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)
e-mail: 764245618@qq.com

Ю.В. НАЗАРОВ
Доктор искусствоведения, профессор РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)
e-mail: nazaret48@yandex.ru

WANG JUNQING
Postgraduate student of the Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art)
e-mail: 764245618@qq.com

Y.V. NAZAROV
Doctor of Arts, Professor of the Russian State University A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art)
e-mail: nazaret48@yandex.ru

DOI: 10.37485/1997-4663_2026_3_2_468_481

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОЙ РЕЗЬБЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕФРИТА

APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL CARVING TECHNOLOGY IN THE MANUFACTURING OF JADE PRODUCTS

В статье рассматривается применение технологии трехмерной резьбы при изготовлении изделий из нефрита, при этом акцент делается на принципе обработки, на технологическом процессе и на технических преимуществах. Трехмерная резьба регулируется системой числового программного управления, генерацией траектории обработки, многоосевым управлением и автоматическим контролем, что обеспечивает пространственное формообразование и высокоточную обработку изделий из нефрита. По сравнению с традиционной ручной резьбой, данная технология обладает явными преимуществами при обработке слож-

ных форм, она повышает производственную эффективность, оптимизирует серийное воспроизведение и контроль качества, способствуя развитию нефритовой резьбы в направлении цифровизации, стандартизации и интеллектуализации.

This article examines the application of 3D carving technology in the manufacture of jade products, focusing on the processing principle, technological process, and technical advantages. 3D carving is controlled by a numerical control system, processing path generation, multi-axis control, and automatic monitoring, which enables spatial shaping and high-precision machining of jade products. Compared with traditional hand carving, this technology offers clear advantages in the processing of complex shapes. It increases production efficiency, optimizes serial production and quality control, and contributes to the development of jade carving towards digitalization, standardization, and intellectualization.

Ключевые слова: технология трехмерной резьбы, изготовление нефритовых изделий; обработка с ЧПУ, многоосевое управление, автоматический контроль, серийное производство.
Keywords: 3D carving technology, jade product manufacturing, CNC machining, multi-axis control, automatic monitoring, serial production.

Введение

В цифровизированной технологии обработка нефрита с помощью трехмерной резьбы занимает исключительно важное место. Наряду с лазерной гравировкой, применение трехмерной резьбы свидетельствует о переходе цифрового изготовления от поверхностной обработки нефрита к объемному формообразованию изделия. Технология трехмерной резьбы опирается на механическое резание и снятие лишних слоев материала. Посредством цифровой системы управления обеспечивается точный контроль пространственной траектории режущего инструмента, что позволяет выполнять объёмное формирование и резьбу по заготовке из нефрита. Благодаря цифровому алгоритмическому управлению, многоосевому приводу и функциям автоматического контроля, технология трехмерной резьбы преодолевает технологические ограничения традиционной нефритовой резьбы, содействуя процессам формообразования,

обработки и обеспечивая мощную техническую поддержку современного серийного производства нефритовых изделий. В следующем разделе системно рассматриваются принципы обработки, технологический процесс и ключевые технические преимущества трехмерной резьбы, используемые в искусстве резьбы по нефриту. Цель данной процедуры — проведение всестороннего анализа роли и ценности трехмерной резьбы в обработке нефрита.

1. Принципы обработки и технологический процесс трехмерной резьбы

1.1. Система ЧПУ и генерация траектории

Технология трехмерной резьбы является важнейшим этапом цифрового изготовления нефритовых изделий, обеспечивающим выполнение объемной резьбы. В отличие от лазерной гравировки, использующей световую энергию как средство бесконтактной поверхностной обработки нефрита, трехмерная резьба основана на технологии числового программного управления (ЧПУ). С помощью заранее спроектированной трехмерной траектории режущий инструмент, установленный на шпинделе, осуществляет объемное формообразование и пространственное резание нефритовой заготовки. Принцип обработки в технологии трёхмерной резьбы основан на согласованной работе системы автоматизированной технологической подготовки производства (CAM) и действий трехмерного станка с ЧПУ. Заготовка из нефрита закрепляется на рабочем столе, после чего мастер переводит уже разработанную цифровую модель в исполнимую траекторию обработки посредством системы CAM. Далее система ЧПУ в соответствии с программой траектории управляет серводвигателями, приводящими в движение режущую головку вдоль трех координатных осей X, Y, Z, а также вращательных осей A и B, тем самым обеспечивая точное преобразование виртуальной цифровой трехмерной модели в изделие из нефрита. Технология работы на станке с ЧПУ не только делает процесс резьбы цифровым и высокоточным, но и обеспечивает его отслеживаемость и параметрическое управление [1].

В процессе трехмерной резьбы первоочередной задачей является выбор оптимального инструмента и рациональное планирование траектории обработки. После импорта трехмерной модели в систему CAM программа анализирует данные о поверхностях, длине, ширине, высоте и других морфологических характеристиках модели, а затем с помощью



Рис. 1. Трехосевой станок для резьбы, четырехосевой станок для резьбы, пятиосевой станок для резьбы Источник: www.yubangsk.com

алгоритма послойного сечения разделяет цифровую модель на несколько уровней обработки. Каждый уровень определяет глубину врезания, угол наклонного резания и траекторию движения инструмента, после чего все данные объединяются в визуализированную сетевую схему траекторий резьбы. В процессе генерации траектории программный алгоритм автоматически рассчитывает и координирует параметры с учётом твёрдости нефритового материала, размера режущего инструмента и скорости снятия материала, поддерживая общий баланс обработки. Кроме того, необходимо по возможности максимально сократить маршрут обработки, уменьшить вспомогательное время, а также сократить интервал подвода и отвода инструмента. Начальную точку подвода и отвода целесообразно выбирать в малозначимых зонах, стремясь обеспечить движение инструмента по касательной, чтобы избежать остановок в процессе подачи и исключить появления следов от инструмента, возникающих при нормальном подводе и отводе. В отличие от традиционного многократного непрерывного резания, основная цель траектории в трехмерной резьбе состоит в минимизации износа инструмента и оптимизации энергопотребления; при этом применяется многоуровневый способ резьбы с постепенным углублением: от поверхности — к внутреннему объему. Благодаря такой послойной организации траектории, режущий инструмент может поддерживать высокую скорость обработки и одновременно обеспечивать высокое качество и точность параметров изделия [2]. В таких центрах нефритового производства Китая, как Шифосы, Сыхуэй и Жуйли, трехосевые, четырехосевые и пятио-

севые станки с ЧПУ уже стали в местных мастерских привычным оборудованием и широко используются при обработке круглой скульптуры: фигур людей, животных и различных предметов (рис. 1). Генерация траектории в трехмерной резьбе одновременно повышает эффективность обработки и пространственную точность изделия, создавая техническую основу для последующего серийного воспроизводства.

1.2. Пространственное послойное разделение и многоосевая синхронная обработка

Технология трехмерной резьбы позволяет в конечном итоге воплотить виртуальный проект в объемное нефритовое изделие, и решающую роль в этом играют пространственное послойное разделение обработки и управление многоосевым синхронным обтачиванием. Нефрит как природный минеральный материал, в зависимости от разновидности, отличается по твердости, форме и плотности, поэтому в процессе резьбы цифровую модель необходимо пространственно разделять по слоям для регулирования положения инструмента и глубины резания. Цель такого послойного разделения заключается прежде всего в настройке траектории инструмента для достижения динамического баланса с сопротивлением материала при резании. При планировании траектории система станка с ЧПУ автоматически выполняет послойную обработку в зависимости от формы спроектированной модели и свойств материала. На первом этапе выполняется черновая обработка: используются инструменты большого диаметра, увеличивается частота вращения, быстро удаляется излишний материал и формируется общий контур изделия. Затем следует чистовая обработка: инструмент заменяется на более мелкий, скорость подачи снижается, шаг между проходами уменьшается, благодаря чему выполняется проработка деталей и коррекция формы. Наконец, с использованием еще более мелкого инструмента повторно проходится траектория для обеспечения гладкости обработанной поверхности. Пространственное послойное разделение не только эффективно повышает стабильность процесса резьбы, но и улучшает коэффициент использования нефритового материала.

Применение технологии многоосевой синхронной обработки имеет решающее значение для пространственной трёхмерной резьбы по нефриту. В традиционной резьбе при обработке сложных форм и ажурных конструкций мастер ограничен углом инструмента, а также обзор

заготовки перекрывается самим материалом и инструментом, из-за чего приходится многократно поворачивать или переворачивать заготовку. Многоосевой станок позволяет посредством серводвигателей управлять обработкой под различными углами. Система станков ЧПУ автоматически регулирует положение инструмента в соответствии с заданной траекторией, обеспечивая согласованность направления резания с обрабатываемой поверхностью и эффективно предотвращая слишком глубокое врезание или наложение следов инструмента. Наиболее распространёнными устройствами для трехмерной резьбы являются четырехосевые и пятиосевые станки, позволяющие выполнять обработку под различными углами (рис. 2). Например, при вырезании человеческой фигуры из нефрита крайне сложно подвести инструмент к складкам одежды, угловым переходам и узким промежуткам в анатомической структуре; нередко мастеру приходится полагаться на опыт и навыки «слепой резьбы». В таких случаях многоосевой станок особенно полезен: он позволяет инструменту входить в материал с разных направлений и выполнять пространственную обработку сложных форм, эффективно устраняя «мёртвые зоны», вызванные ограничениями инструмента в традиционной резьбе [3]. В производстве круглой нефритовой скульптуры технология многоосевой синхронной обработки эффективно обеспечивает полноту воплощения сложной проектной модели. Благодаря совместному действию послойной обработки и многоосевого управления, трехмерная резьба обеспечивает непрерывное, объемное и точное воспроизведение виртуальной модели в материале, что выводит современное производство нефритовых изделий на системный и серийный уровень.



Рис. 2. Принцип осуществления резьбы на станке с ЧПУ. Источник: Изображение создано автором с помощью ИИ

1.3. Процесс снятия материала и формообразования

По своей сущности процесс формообразования в трехмерной резьбе аналогичен традиционной резьбе и представляет собой результат механического взаимодействия между режущим инструментом и неф-

ритом. Электродвигатель приводит сверлильно-режущий инструмент во вращение с высокой скоростью; при контакте с поверхностью нефрита происходит снятие материала, и в результате послойной обработки по заданной траектории формируется изделие, в высокой степени соответствующее трехмерной модели. Во всем процессе снятия материала инструмент играет ключевую роль. Ввиду высокой твердости нефритового сырья, режущая часть инструмента обычно изготавливается из алмаза. Различные типы инструмента выполняют разные функции. Шаровой инструмент с полусферической рабочей частью в основном используется на этапе черновой обработки для резания криволинейных и плавных поверхностей и быстрого удаления материала; сферический инструмент является наиболее часто применяемым на протяжении всего процесса изготовления изделия. Плоскодонный инструмент с цилиндрическим плоским торцом также в основном используется на стадии черновой обработки для отделки плоскостей и наклонных вертикальных поверхностей, быстро формируя внешний контур изделия. Конический шаровой инструмент имеет конусную форму корпуса и шарообразный переход на вершине без острого угла; такой инструмент главным образом применяется на стадии тонкой обработки для детальной проработки сложных структур и является основным приспособлением для обработки мелких деталей. Автоматическая система смены инструмента на оборудовании для трёхмерной резьбы может в соответствии с этапом процедуры изготовления заменять режущие головки, обеспечивая бесшовный переход от черновой обработки к чистовой. В процессе снятия материала станок трехмерной резьбы на основе обратной связи по усилию процесса резания поддерживает баланс и стабильность нагрузки между станком и инструментом. Когда система фиксирует многократное возрастание сопротивления движению инструмента по траектории или определяет внезапное исчезновение сопротивления, станок с ЧПУ снижает скорость вращения, изменяет траекторию движения и затем продолжает обработку.

В процессе окончательного формообразования трехмерная резьба использует технологии резания с постоянной скоростью и управления температурой. Во время обработки система ЧПУ в реальном времени отслеживает изменение нагрузки и температуры инструмента и автоматически корректирует параметры, обеспечивая стабильность работы оборудования. Обычно станки для трёхмерной резьбы оснащаются системой циркуляции воды, подающей воду на заготовку в процессе обработки, предотвращая

тепловые повреждения нефрита, вызванные перегревом инструмента. В некоторых экспериментальных мастерских художественной обработки исследователи применяют технологии имитационного моделирования для мониторинга процесса резьбы в реальном времени. Во-первых, виртуальное моделирование траектории инструмента позволяет заранее проверить, не возникнет ли столкновение инструмента с деталями станка, а также предотвращает чрезмерно глубокую резку, обеспечивая высокую степень соответствия готового изделия исходной трёхмерной проектной модели [4]. Система станка с ЧПУ на основе траектории инструмента и температурных данных может строить график линейной скорости снятия материала, тем самым прогнозируя эффективность удаления сырья и плотностные характеристики нефритовой заготовки. Например, для участков с малой толщиной кромки или известными внутренними дефектами можно заранее оценить риск скола или растрескивания при обработке инструментом, что важно для последующей обработки изделия. После завершения трёхмерной резьбы готовое изделие может быть дополнительно отсканировано трехмерным сканером, после чего система автоматически сопоставляет готовое изделие с проектной моделью, обеспечивая контроль точности формообразования. Таким образом, механизм снятия материала и интеллектуального формообразования делает трехмерную резьбу идеальной технологией для обработки сложных объемных форм и пространственного построения изделий из нефрита.

2. Ключевые технические преимущества трехмерной резьбы

2.1. Способность к пространственному формообразованию объемных структур

Наиболее важным преимуществом применения трехмерной резьбы в изготовлении нефритовых изделий является ее способность к объемному пространственному формообразованию. Обычно при традиционной ручной резьбе мастер должен преобразовать нанесенный на нефрит двумерный контурный рисунок в объемную форму. Однако из-за субъективности зрительной оценки мастера, из-за ограничений, связанных с формой заготовки, а также из-за инструментальных ограничений в процессе обработки зачастую трудно целостно и безупречно воспроизвести из пространственной нефритовой болванки объемную форму, заданную контурным рисунком. Трехмерная резьба, напротив, благодаря преимуществам многоосевой синхронной обработки позволяет режуще-

му инструменту обрабатывать материал под различными углами, обеспечивая в пространстве нефрита всестороннее 360° формообразование без «мёртвых зон», что и определяет преимущество данного метода при создании сложных объемных форм. Технология ЧПУ на основе анализа поверхности проектной модели способна автоматически планировать направление резания, угол наклона и маршрут движения резца. Благодаря этому, инструмент сохраняет постоянную ориентацию и равномерный шаг проходов на сложной пространственной структуре нефрита, избегая таких типичных для традиционной резьбы проблем, как чрезмерная глубина обработки, перекрытие пространственных структур и деформация формы. Например, наиболее современные пятиосевые станки, в отличие от лазерной гравировки, ориентированной на поверхностное декорирование и неглубокий рельеф, обладают преимуществом именно в пространственном формообразовании объемных структур и способны удовлетворять требованиям различных видов обработки, включая рельефную резьбу, круглую скульптуру, ажурную резьбу и выемку внутренней полости у сосудов и предметов.

Кроме того, способность к объемному формообразованию внутри материала проявляется и в координации деталей изделия ,и в пропорциональном строе его конструкции. На этапе цифрового моделирования технология трехмерной резьбы позволяет посредством регулирования параметров выполнять локальное увеличение или оптимизацию деталей, станок трехмерной резьбы, исходя из скорректированных данных, автоматически изменяет траекторию инструмента и глубину резки. Это делает возможным тонкое локальное усиление и корректировку конфигурации изделия без нарушения исходной формы. Применение данной технологии повышает точность изготовления объемного изделия в нефрите и делает его пластическую структуру более гармоничной и целостной. Сочетание параметрического компьютерного управления и многоосевого оборудования освобождает процесс трехмерной резьбы от ошибок, вызванных субъективной визуальной оценкой и индивидуальным опытом, переводя его в русло научно обоснованного, точного контроля. Практика показывает, что в традиционной ручной резьбе для точного позиционирования формы требуется многократное нанесение двумерного линейного рисунка, тогда как при трёхмерной резьбе на основе цифровой модели пятиосевой станок может за один цикл завершить сложное объёмное формообразование. Это сокращает необходимость в нанесении вспомога-

тельного рисунка, уменьшает продолжительность технологического процесса, повышает эффективность обработки и обеспечивает стабильность параметров готового нефритового изделия. Механизм пространственного контроля объемной формы в трехмерной резьбе не только повышает точность художественного воплощения, но и создает техническую основу для усложнения структуры и совершенствования пространственного решения изделий из нефрита.

2.2. Технологическая гибкость и повторяемое изготовление

Трехмерная резьба обладает заметными преимуществами в технологической гибкости и возможности серийного воспроизводства. Прежде всего гибкость технологии проявляется в том, что система станка с ЧПУ может автоматически корректировать способ обработки в зависимости от разновидности нефритового материала, конфигурации формы и проектного решения, реализуя автоматизированный контроль процесса резьбы. Из-за особенностей материала и твердости нефрита сложность его обработки обычно значительно выше, чем при работе с древесиной, металлом и другими материалами. В процессе резьбы параметры обработки могут быть изменены через систему станка с ЧПУ, что позволяет быстро регулировать траекторию движения инструмента, глубину врезания, угол резания и скорость обработки в соответствии с изменениями структуры материала. Во время работы оператор может наблюдать данные обратной связи в программной среде и в реальном времени корректировать параметры, заново генерируя траекторию обработки для продолжения резьбы без прерывания процесса, что обеспечивает его целостность изделия. Кроме того, трехмерная резьба допускает модульную обработку: сложный проект может быть разделен на несколько модулей, каждый из которых обрабатывается отдельно, после чего осуществляется их интеграция в единую композицию. Такая модульная схема часто применяется в нефритовых украшениях или при изготовлении крупных предметов. Например, при обработке традиционного мотива нефритового С-образного дракона работа нередко делится на два этапа: сначала выполняется обработка общей формы самого дракона, затем — резьба декоративного орнамента на его теле. Модульный способ обработки позволяет столь же гибко комбинировать орнаментальные элементы на поверхности С-образного дракона, словно меняя ему «одежду». В процессе обработки нефрита регулировка параметров и модульная гибкость резьбы позволяют в

зависимости от проектных требований, от формы материала и от различий в заготовке гибко изменять последовательность операций и траекторию резания, тем самым значительно повышая эффективность, по сравнению с традиционной нефритовой резьбой.



Рис. 3. Серийное производство изделий методом резьбы на станке с ЧПУ. Источник: http://xhslink.com

Следующее важное преимущество трехмерной резьбы заключается в возможности повторяемости изготовления. Компьютер может длительно хранить данные трехмерной модели, параметры резьбы и траектории обработки, а оператор в любой момент может вновь загрузить сохраненные данные в станок трехмерной резьбы для повторного воспроизведения технологического процесса (рис. 3). Высокая точность трехмерной резьбы практически исключает различия между готовыми изделиями, обеспечивая точное воспроизведение формы, пропорций и деталей. В сравнении с неопределенностью, присущей традиционной ручной резьбе, трехмерная резьба стандартизирует технологический процесс, благодаря чему изготовленные нефритовые изделия могут с абсолютной точностью сопоставляться и измеряться относительно исходной трехмерной модели. Это свойство закладывает основу для дизайна серийных изделий и массового производства украшений из нефрита. В настоящее время во многих цифровых нефриторезных мастерских уже сформирована интегрированная производственная система: от моделирования — до обработки. В процессе работы оператор может дополнительно корректировать данные резьбы в соответствии с производственными потребностями и сохранять эти изменения, что создает базу для дальнейшей оптимизации последующего производства. Реализация схемы повторяемого изготовления вовсе не означает механическое копирование; напротив, данный прием предоставляет более гибкое пространство для художественного творчества. В рамках одной и той же модели оператор может варьировать параметры данных, тем самым производя разные варианты нефритовых изделий и достигая индивидуализированного художественного облика. Такой способ производства, сочетающий стандартизацию и вариативность, с одной стороны, сохраняет уникальный характер нефритового произведения, а, с другой, — отвечает потребности современного рынка в воспроизводимом производстве.

2.3. Точность обработки и автоматический контроль

Третье ключевое преимущество трехмерной резьбы состоит в высокой точности технологического процесса и наличии системы автоматического контроля. В настоящее время в оборудовании для трехмерной резьбы повсеместно используется замкнутый цикл обработки по схеме: «обработка — обратная связь — обработка». С помощью встроенных в оборудование линейных измерительных шкал, лазерных интерферометров, датчиков положения и других средств в реальном времени осуществляется мониторинг положения инструмента на траектории; благодаря этим устройствам погрешность движения инструмента удерживается в пределах микронного диапазона, что обеспечивает высокоточную резьбу и адекватное воспроизведение модели. Станок трехмерной резьбы способен на основе обратной связи автоматически выявлять износ инструмента, отклонение траектории и иные проблемы, своевременно корректируя через систему станка с ЧПУ траекторию, глубину врезания и другие параметры, чтобы движение инструмента постоянно соответствовало внешнему контуру трехмерной модели. Например, если в процессе обработки инструмент встречает препятствие и не может эффективно снимать материал, система станка с ЧПУ на основе обратной связи своевременно корректирует траекторию и параметры врезания, предотвращая повреждение инструмента из-за перегрузки или купируя скалывание нефритового изделия. Сочетание точного управления резьбой и оперативной обратной связи делает процесс изготовления нефритовых изделий свободным от неопределенности, характерной для ручной работы, обеспечивая длительную стабильность и высокую точность обработки.

Технология автоматического контроля также позволяет осуществлять контроль качества готового нефритового изделия. После завершения обработки на станке оператор выполняет повторное сканирование уже готового изделия с помощью трехмерного сканера, формируя новую цифровую трехмерную модель. Затем система автоматического контроля сравнивает новую модель с исходной проектной моделью и автоматически строит карту распределения отклонений, маркируя участки смещения, чрезмерно глубокой или недостаточно глубокой обработки. После этого результаты анализа вновь вводятся в станок трехмерной резьбы для так называемой вторичной обработки. Применение автоматического контроля позволяет значительно повысить непрерывность структуры, точность размеров и степень воспроизведения деталей в нефритовых изделиях.

Кроме того, автоматический контроль обеспечивает хранение и отслеживает данные, позволяя сохранять параметры каждого этапа обработки, записи об отклонениях и схемы коррекции, что создаёт информационную поддержку для последующего серийного производства. В настоящее время некоторые экспериментальные лаборатории трехмерной резьбы начинают интегрировать технологии искусственного интеллекта (AI) с числовым программным управлением, используя (AI) для анализа динамики данных автоматического контроля и предварительного прогнозирования возможных отклонений в процессе обработки, тем самым формируя самообучающуюся интеллектуальную систему контроля [5]. В результате трехмерная резьба способна переходить к интеллектуальному режиму самоконтроля и самокоррекции, обеспечивая всесторонний интеллектуальный контроль качества изделия в процессе обработки и закладывая основу для цифровой модернизации всей отрасли нефритовой резьбы.

Заключение

Таким образом, технология трёхмерной резьбы играет важную роль в современном производстве изделий из нефрита. Благодаря применению цифрового моделирования, систем станков с ЧПУ и многоосевой обработки, трехмерная резьба позволяет более точно воспроизводить сложные пространственные формы и существенно повышает стабильность технологического процесса. Одновременно автоматический контроль и коррекция ошибок обеспечивают точность обработки и гарантируют качество готового изделия. По сравнению с традиционной ручной резьбой технология трёхмерной резьбы не только повышает эффективность производства и расширяет возможности серийного изготовления, но и создает техническую основу для интеграции художественного проектирования и цифрового производства. Ее внедрение способствует переходу нефритовой резьбы от традиционного ремесленного способа к цифровому, интеллектуальному и стандартизированному формату.

Список литературы:

1. *Чжан Синъу, Чжао Цинчжи, Лю Цзикай.* Многофункциональное исследование CAD/CAM для трёхмерного станка с ЧПУ и его применение // Комбинированные станки и технологии автоматизированной обработки. — 2017. — № 8. — С. 119–121.

2. *Май Цимин, Чжан Цзяньцян*. Исследование технологии оптимизации траектории инструмента для гравировального станка с ЧПУ // Станки и гидравлика. — 2021. — Том 49. — № 16. — С. 60–66.

3. *Сюй Чжаокай*. Применение технологий цифровой скульптуры в дизайне ювелирных изделий: магистерская дис. — Пекин: Китайский геологический университет (Пекин), 2019.

4. *Шэнь Тяньюнь, Шэнь Тао, Хань Юйсян*. Практика виртуальной реставрации керамических артефактов на основе технологии цифровой резьбы: на примере керамических памятников из собрания Столичного музея // Китайская керамическая промышленность. — 2025. — Том 32. — № 5. — С. 43–49.

5. *Чжан Хэнъянь*. Реконструкция и применение поверхностной модели гравировальных изделий в контексте цифрового двойника: магистерская дис. — Янчжоу: Янчжоуский университет, 2022.