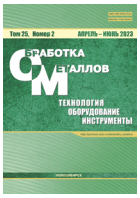
Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 2 с. 45–67
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-45-67

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Гибридное технологическое оборудование: к вопросу рационального выбора объектов модернизации при проведении работ, связанных с дооснащением стандартной станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии

Вадим Скиба [1, a, *], ***Егор Зверев*** [1, b], ***Павел Скиба*** [2, c], ***Алексей Черников*** [3, 1, d], ***Андрей Попков*** [1, e]

[1] Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия
[2] АО «Новосибирский стрелочный завод», ул. Аксенова, 7, г. Новосибирск, 630025, Россия
[3] ОАО «ГЛК-Промышленные технологии», ул. Большевистская, 177, цех 16, г. Новосибирск, 630083, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0003-4405-6623, egor_z@ngs.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-0327-992X, Pavel_skeeba_ptm@mail.ru, [d] https://orcid.org/0009-0006-9412-7687, aleksey.chernikov.97@mail.ru,
[e] https://orcid.org/0009-0006-5587-9990, andrej.popkov.2013@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.06(07): 621.785

История статьи:
Поступила: 15 марта 2023
Рецензирование: 17 апреля 2023
Принята к печати: 15 мая 2023
Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:
Гибридное оборудование
Многолезвийная механическая обработка
Высокоэнергетический нагрев
Резание
Индукционная закалка

Финансирование
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00945, https://rscf.ru/project/23-29-00945/.

Благодарности
Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции невозможно без достижения высоких показателей ресурсо- и энергосбережения при обеспечении современными станочными системами должного уровня производственной гибкости в совокупности с гарантированно высокими значениями производительности обработки и требуемым уровнем качества изготовления деталей. Недостаточный или избыточный запас возможностей технологического оборудования приводит к снижению его экономической эффективности, повышению капитальных затрат и, как следствие, удорожанию продукции. В станкостроении – стратегически значимой и базовой отрасли для модернизации машиностроения – наблюдается особый интерес к разработке нового типа технологического оборудования, позволяющего реализовать методы модифицирования поверхностных слоев деталей путем их обработки источниками концентрированной энергии. Совмещение двух обрабатывающих технологий (механической и поверхностно-термической операций) в условиях интегрального оборудования позволяет нивелировать недостатки монотехнологий и получить новые эффекты, недостижимые при использовании технологий по отдельности. Обеспечение оптимального уровня качества – одного из безусловных требований рыночной экономики – является приоритетной задачей при разработке общей концепции технологического оборудования. Таким образом, следует отметить, что требуемый и определенный комплекс потребительских свойств закладывается при проектировании. Следовательно, задача оптимизации качества относится к области прогностики и должна комплексно решаться на начальном этапе разработки концепции технологического оборудования. **Цель настоящих исследований** заключается в рациональном выборе объектов модернизации при проведении работ, связанных с дооснащением стандартной станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии. **Методы.** Теоретические исследования возможного структурного состава и компоновки гибридного оборудования при интеграции механических и поверхностно-термических процессов производились с учетом основных положений структурного синтеза и компонетики металлообрабатывающих систем. При проведении исследований были затронуты вопросы, связанные с основными положениями системного анализа, геометрической теорией формирования поверхностей, конструирования металлообрабатывающих станков, методов математического и компьютерного моделирования. **Результаты и обсуждение.** Теоретическими исследованиями было установлено, что в настоящее время большинство параметрических (типоразмерных) рядов металлорежущих станков общего назначения, построенных по закону геометрической прогрессии с постоянным знаменателем, являются причиной многократного дублирования отдельных размерных диапазонов на станках одного ряда. Это дает основание говорить о необоснованном увеличении количества его членов и, как следствие этого, росте расходов на проектирование, изготовление и эксплуатацию оборудования. Авторы придерживаются точки зрения, что для обеспечения максимальной эффективности гибридного металлообрабатывающего оборудования необходимо реализовать параметрический ряд, построенный с переменным знаменателем. Подобный принцип формирования параметрического ряда позволяет обеспечить практически равную вероятность обработки с максимальной производительностью поверхности любого размера при трехкратном перекрытии диапазонов. Произведена апробация методики формирования структуры параметрических рядов. Теоретически доказано, что при эксплуатации вертикально-фрезерных станков действующего параметрического ряда со знаменателем $\varphi = 1{,}26$ (ГОСТ 9726–89) имеет место многократное перекрытие отдельных размерных диапазонов, достигающих в определенном интервале размеров девятикратной величины, что, безусловно, отражается на эффективности действующего станочного парка. В свою очередь, при синтезе перспективного параметрического ряда вертикально-фрезерных станков с крестовым столом было показано, что новый параметрический ряд имеет меньшее количество членов. Сокращение номенклатуры выпускаемых и модернизируемых станков позволит повысить серийность их производства и снизить текущие расходы на ремонт и обслуживание, причем этот эффект достигается при сохранении гибкости станочного парка.

Для цитирования: Гибридное технологическое оборудование: к вопросу рационального выбора объектов модернизации при проведении работ, связанных с дооснащением стандартной станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии / В.Ю. Скиба, Е.А. Зверев, П.Ю. Скиба, А.Д. Черников, А.С. Попков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 45–67. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-45-67.

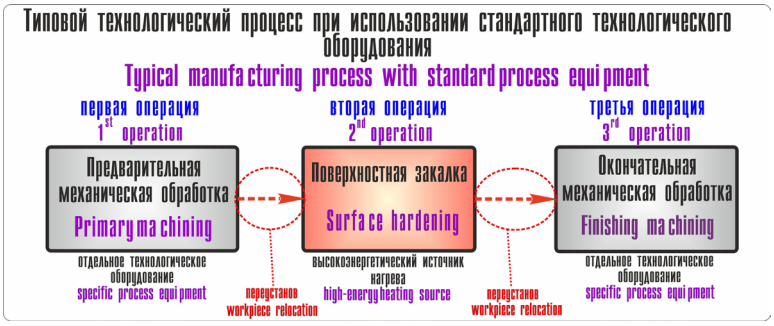
***Адрес для переписки**
Скиба Вадим Юрьевич, к.т.н., доцент, с.н.с
Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,
г. Новосибирск, 630073, Россия
Тел.: 8 (383) 346-17-79, **e-mail:** skeeba_vadim@mail.ru

Введение

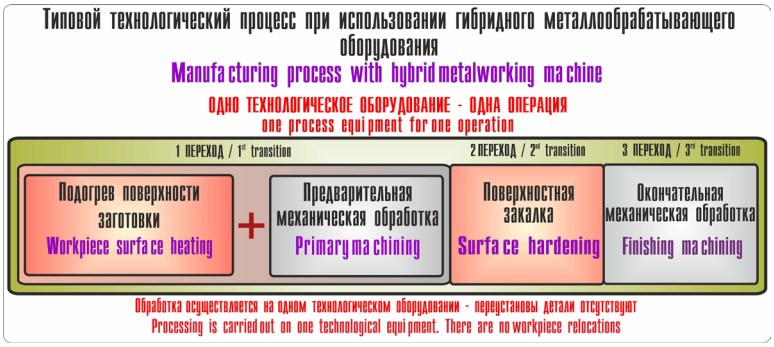
В условиях интенсификации рыночного производства наблюдается стремление к сокращению энергетических, материальных и людских ресурсов, что приводит к необходимости повышения эффективности технологического оборудования в значительной мере за счет выбора наиболее рациональных технических характеристик. Эта тенденция, направленная на повышение энерго- и ресурсосбережения и обусловленная применением современных высокопроизводительных станочных систем, которые обладают необходимым уровнем производственной гибкости, ведет к росту конкурентоспособности выпускаемой продукции высокого качества [1–18]. Использование оборудования с запасом возможностей, недостаточным или превышающим требуемый, снижает экономическую эффективность и повышает уровень капитальных затрат, что приводит к увеличению себестоимости продукции [19, 20].

Одним из основных векторов развития современного машиностроения является разработка и создание высокотехнологичного оборудования. В станкостроении, ведущей машиностроительной отрасли, примером такого оборудования могут служить комплексированные металлообрабатывающие системы [21–32], в основу построения которых положен принцип полифункциональной интеграции [5, 7, 17, 21, 33–46].

Один из способов повысить технологический потенциал металлообрабатывающего оборудования [1, 5, 17, 21, 24, 26, 27, 38, 42, 44] – это интеграция нескольких технологических операций на одном гибридном станке (например, предварительное фрезерование – поверхностная закалка – чистовое фрезерование; абразивное шлифование – поверхностная закалка; точение – закалка – ультразвуковая упрочняюще-отделочная обработка; точение – закалка – алмазное выглаживание [28, 31, 37–64]), что дает возможность обеспечить автономную работу отдельных единиц оборудования в условиях гибкого производства. Это позволит сократить номенклатуру станочного парка, что в свою очередь приведет к уменьшению площадей цехов и предприятий в целом [1, 5, 7, 17, 21, 38, 62]. Решение производственных задач с применением такого оборудования будет менее ресурсозатратным и, кроме того, приведет к сокращению производственного цикла изготовления деталей машин (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Типовой технологический процесс (*а*) и технологический процесс при использовании гибридного металлообрабатывающего оборудования (*б*)

Fig. 1. Typical manufacturing process (*а*) and manufacturing process with hybrid metalworking equipment (*б*)

В традиционном процессе изготовления деталей отдельные операции (поверхностно-термического упрочнения и механической обработки) осуществляются на разном оборудовании и на разных участках цехов, что способствует появлению значительных погрешностей на каждой стадии технологического процесса: деформации материала при термической обработке, погрешности установки деталей на каждой единице оборудования. Всё это приводит к необходимости назначения больших припусков на чистовую обработку, которые могут составить до 30–40 % заданной глубины от упрочненного слоя [7, 17, 28, 38, 62]. Тогда необходимая глубина упрочнения, обеспечиваемая термической обработкой, должна быть несколько больше, чем указано в документации. Кроме того, наиболее эффективная часть упрочненного поверхностного слоя удаляется финишной механической обработкой. В результате использования такой технологии снижается производительность как поверхностно-термических, так и механических операций, а энергозатраты возрастают. Объединение двух этих процессов на одном оборудовании позволяет нивелировать указанные выше недостатки и достичь более высоких результатов. Разработанные технологические рекомендации, реализуемые на предлагаемом гибридном оборудовании, позволят повысить технико-экономическую эффективность производства и снизить потери [7, 17, 28, 38, 62, 64]. Внедрение предлагаемой новой технологии, в свою очередь, увеличит конкурентоспособность производимой продукции. На эффективность применения интегрированных технологий также оказывает значительное влияние снижение потерь времени на промежуточные и вспомогательные операции в общем технологическом процессе.

Появлению нового метода обработки деталей, связанного с использованием радиочастот – высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты (ВЭН ТВЧ), – способствовали разработки в области миниатюризации индукторов и оснащения их ферритовыми магнитопроводами. Предлагаемый метод на данный момент является одним из наиболее интересных методов упрочнения конструкционных сталей [38, 42, 65–70]. Его конкурентоспособность по отношению к другим методам упрочнения металла без оплавления (рис. 2), такими как лазер или электронный луч, обусловлено возможностью реализации технологического процесса закалки при удельных мощностях нагрева порядка 400 МВт/м^2. Стоит отметить, что объединение двух процессов обработки (механического и поверхностно-термического) на единой станочной базе [7, 28, 38, 42, 62] обеспечивает постоянство требуемого зазора между индуктором и обрабатываемой деталью, который составляет $\delta = 0{,}1\ldots0{,}2$ мм, что является необходимым условием обработки ВЭН ТВЧ.

Создание нового стандартного оборудования связано с большими финансовыми и трудовыми затратами, в то время как модернизация существующих станков обходится значительно дешевле. Исходя из этого нами предлагается следующее решение: модернизация стандартного металлорежущего станка, которая заключается в дооснащении его дополнительным концентрированным источником энергии – например, генератором ТВЧ. В качестве источника энергии высокой концентрации нами будут рассмо-

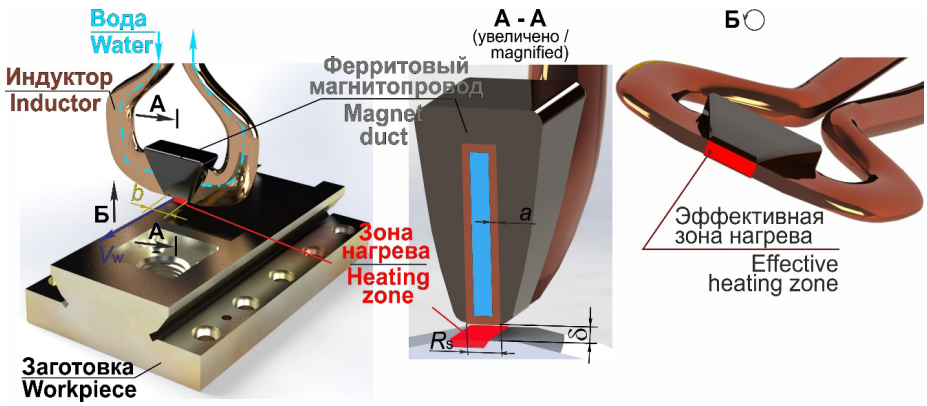


Рис. 2. Схема обработки при ВЭН ТВЧ
Fig. 2. The scheme of HEH HFC processing

трены генераторы типа СВЧ. Это обусловлено конструктивными особенностями стандартной станочной системы и современным уровнем развития микропроцессорной техники в области высокочастотных промышленных установок тиристорного типа [7, 28, 38, 42, 62].

Изменения, внесенные в процессе модернизации стандартной станочной системы, не должны оказать негативного влияния на качественные показатели оборудования. Исходя из требований рыночной экономики, обеспечение оптимального уровня качества изделий является приоритетной задачей, решение которой должно осуществляться уже на стадии разработки общей концепции технологического оборудования. Качество изделия обусловливается определенным комплексом потребительских свойств, заложенных на начальном этапе концептуального проектирования, что позволяет прогнозировать его оптимальный уровень. Так, например, выбор структуры параметрического (типоразмерного) ряда станков и обоснование технических характеристик его элементов должны осуществляться параллельно, что в условиях современного развития машиностроения является составной частью систем автоматического проектирования технологического оборудования [19, 20]. Несмотря на имеющиеся некоторые научные результаты в этом направлении, единая обобщенная теория решения данного вопроса отсутствует.

Качество является многогранным и емким понятием, оно отображает ряд свойств рассматриваемого объекта, характеризующих способность продукции в соответствии со своим назначением удовлетворять определенные потребительские требования. С инженерной точки зрения качество оценивается методом сравнительного анализа совокупности свойств какого-либо изделия со свойствами эталона или аналогичного изделия, принятого за базу сравнения. Прогноз качества планируемого изделия следует начинать с определения минимального набора свойств, необходимых для его оценки. Свойства должны выбираться из системы фундаментальных категорий и понятий, и они должны быть значимыми. К ним относятся пространство и время – категории, отражающие формы существования материи: протяженность и взаиморасположение материальных объектов, длительность и последовательность смены событий. Как общая мера движения и взаимодействия всех видов материи используется еще одна категория – энергия [19, 20].

Однако свойств и описывающих их параметров или характеристик, присущих природным объектам, обычно оказывается недостаточно для описания созданных человеком технических систем. В таком случае необходимо воспользоваться стандартной номенклатурой основных групп показателей, позволяющей всесторонне оценить качество рассматриваемой продукции. В станкостроительной отрасли традиционно используют определенный набор частных и комплексных показателей, которые в большинстве случаев применяют при выборе оборудования для выполнения определенных функций, а также выявлении его технического уровня и конкурентоспособности [7, 17, 19, 20]. Эффективность, производительность, технологичность, гибкость, точность, надежность, эргономичность и эстетичность станочных систем, как правило, являются основными показателями качества оборудования.

Очевидно, что при обосновании основных параметров и технических характеристик оборудования чаще всего оперируют их количественной оценкой: габаритами рабочей зоны (пространство), скоростными возможностями (время) и мощностью приводов (энергия). Дополнительные параметры, определяющие отличия одних объектов от других, в большинстве случаев могут быть представлены в виде качественных оценок – например, различными классами точности, типом управления (ручное или программное), архитектурой и другими характеристиками гибридных металлообрабатывающих станков [7, 17, 19, 20, 38, 42].

Разница между проектными возможностями оборудования и возможностями, необходимыми для осуществления своих функций в соответствии с назначением, представляет собой потери (избыточный или недостаточный запас способностей).

К факторам, влияющим на возникновение потерь, можно отнести неполное использование рабочего пространства, мощность электродвигателя, диапазон частот вращения шпинделя и др. В качестве примера можно рассмотреть результаты исследования условий эксплуатации фрезерных станков с ЧПУ, показывающие, что при выполнении 90 % операций мощность, потре-

бляемая приводом главного движения, составляет не более 50 % от номинального значения, грузоподъемность стола используется не более чем на 20 %, применяемые рабочие подачи фактически не превышают 1/6 от максимально допустимых и т. д. Для станков других групп наблюдается аналогичная ситуация [19, 20, 71, 72]. Результаты исследований зарубежных ученых практически идентичны отечественным. Данные, полученные для универсальных металлорежущих станков с ручным управлением и станков с ЧПУ, в части использования их технологических возможностей также не имеют значительных отличий.

Цель настоящих исследований заключается в рациональном выборе объектов модернизации при проведении работ, связанных с дооснащением стандартной станочной системы дополнительным концентрированным источником энергии, в качестве которого может быть использован генератор ТВЧ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Предложить методику структурного анализа, позволяющую эффективно выполнять предпроектные исследования при разработке гибридного металлообрабатывающего оборудования.

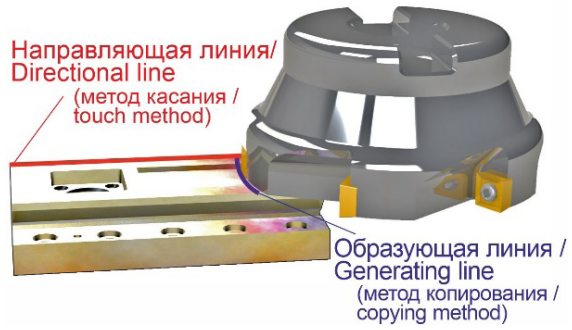
2. Разработать метод формирования структуры параметрических рядов станочного оборудования с учетом равенства средних потерь производительности.

Теория и методика экспериментального исследования

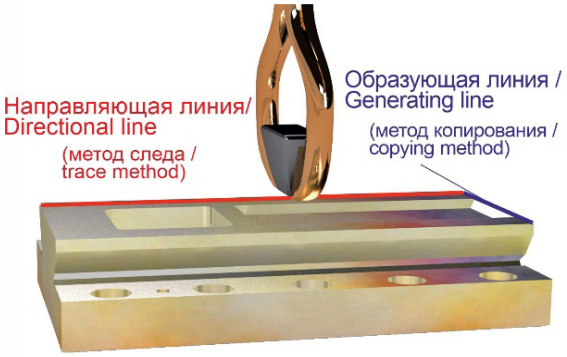
Исполнительные движения гибридной металлообрабатывающей системы (ГМС) и необходимое количество их настраиваемых параметров определялись посредством применения структурно-кинематического синтеза механизмов металлорежущих станков [73–76]. Основные положения структурного синтеза и компонетики рассматриваемых систем, приведенные в работах [75–85], использовались для проведения исследований предполагаемого структурного состава и компоновки ГМС, в которой интегрированы механические операции и поверхностно-термическая обработка.

При разработке интегрального металлообрабатывающего оборудования предполагается реализовать на одном из технологических переходов гибридного станка метод высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты.

Производящие линии обрабатываемой поверхности формируются локальными участками нагрева. Габариты этих линий обусловлены особенностями конструкции индукторов для ВЭН ТВЧ и определяются шириной активного провода индуктора и длиной ферритового магнитопровода (см. рис. 2). Очевидно, что для осуществления операций поверхностной закалки и формообразования методом фрезерования (рис. 3) требуются одинаковые согласованные относительные движения заготовки и режущего инструмента. Результаты структурно-кинематического анализа показали, что на всех переходах комплексированной обработки (предварительное фрезерование, закалка ВЭН ТВЧ и чистовое фрезерование) исполнительные движения и комплекс настраиваемых в них параметров идентичны.



а



б

Рис. 3. Формообразование плоской поверхности:
а – при механической обработке (фрезерование);
б – при поверхностной закалке ВЭН ТВЧ индуктором петлевого типа с магнитопроводом

Fig. 3. Generation of geometry (flat surface):
а – during machining (milling); *б* – during surface hardening by HEH HFC with loop inductor with a magnetic core

На рис. 4 представлены частные структурные формулы компоновок в совокупности со структурно-кинематическими схемами (СКС) для каждого в отдельности метода обработки.

Последующий синтез обобщенной кинематической структуры разрабатываемой гибридной металлообрабатывающей системы на основе консольно-фрезерного станка производился по схеме агрегатного построения компоновки (рис. 5). При этом методе формулу компоновки можно представить в следующем виде:

$$XYZ0b(w_1\widehat{C}_v + w_2),$$

где X, Y – продольное и поперечное перемещение крестового стола соответственно; Z – вертикальное перемещение консоли; b – поворот шпиндельной головки; w_1 – ручное перемеще-

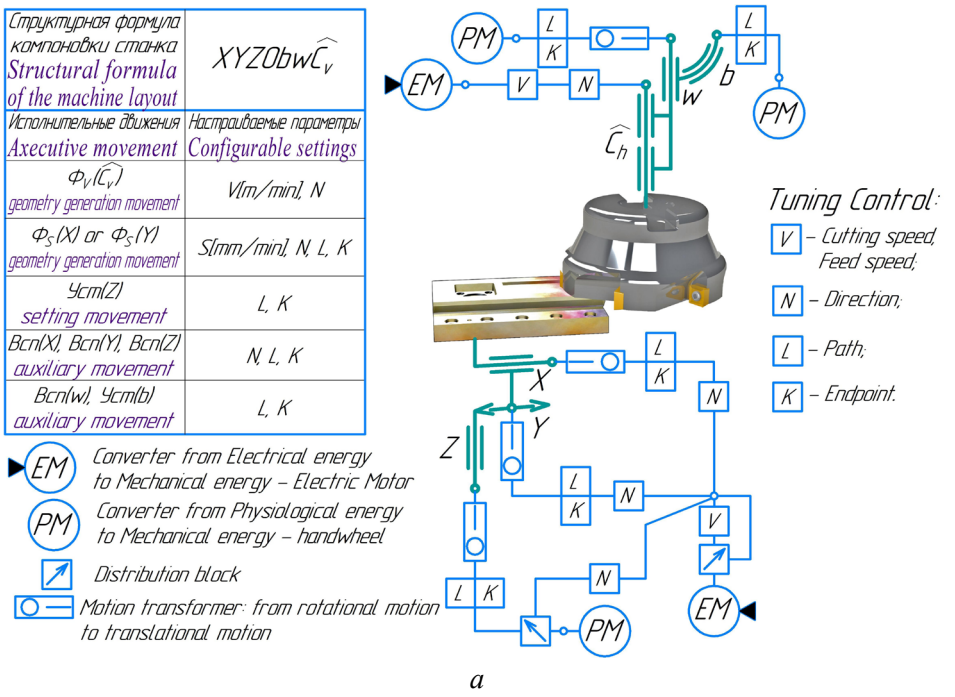


Рис. 4. Структурно-кинематические схемы при обработке плоской поверхности:

а – фрезерование; *б* – поверхностная закалка ВЭН ТВЧ индуктором петлевого типа с магнитопроводом

Fig. 4. Structural kinematic schemes for processing a flat surface:

a – milling; *б* – surface hardening by HEH HFC with loop inductor with a magnetic core

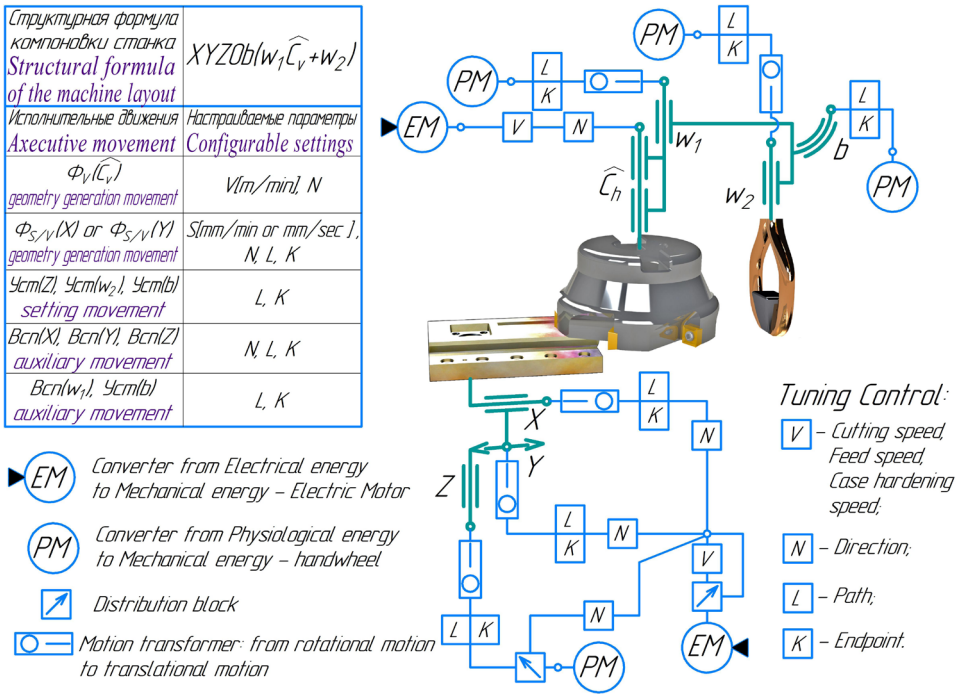


Рис. 5. Структурно-кинематическая схема гибридной металлообрабатывающей системы – структурная формула $XYZ0b(w_1\widehat{C}_v + w_2)$

Fig. 5. Structural kinematic scheme of the hybrid metalworking system: the structural formula is $XYZ0b(w_1\widehat{C}_v + w_2)$

ние шпиндельной гильзы вдоль оси шпинделя; $\widehat{C}_v$ – вращение шпинделя с режущим инструментом; w_2 – ручное перемещение индуктора вдоль оси шпинделя. Блок C_v, выполняющий главное движение резания при фрезеровании, дополнительно помечен знаком ∧.

В настоящее время большинство параметрических (типоразмерных) рядов металлорежущих станков общего назначения построено по закону геометрической прогрессии с постоянным знаменателем φ, равным 1,26 или 1,41. Диапазон размеров обрабатываемых деталей или применяемого режущего инструмента для каждого члена ряда, как правило, значительно превышает эту величину. Поэтому существует некоторое перекрытие размерных диапазонов D оборудования у смежных членов параметрического ряда. Оно обеспечивает определенную гибкость станочного парка машиностроительных предприятий, что позволяет им без замены оборудования быстро и практически без снижения производительности переходить на выпуск новой продукции. Однако многократное дублирование отдельных размерных диапазонов на станках одного ряда приводит к увеличению количества его членов и, как следствие, к росту расходов на проектирование, изготовление и эксплуатацию оборудования. Поэтому проблема установления оптимальной структуры параметрических рядов технологического оборудования весьма актуальна.

В работе [86] показано, что функциональную способность i-й технологической системы, определяемую ее параметрами (и характеристиками), можно оценить через так называемый критерий условных средних потерь R_i, обеспечивающих минимум ошибки принятия решения:

$$R_i = RC_i\left[1 - \prod_{j=1}^{r} p_{ij}\left\{\frac{DC_j - UC_j}{[\chi_j]} \le 1\right\}\right], \quad (1)$$

где RC_i – приведенные затраты; p_{ij} – вероятность отсутствия потерь в технологической системе по j-му параметру; DC_j – проектные возможности оборудования по j-му параметру; UC_j – используемые возможности металлообрабатывающего станка по j-му параметру; $[\chi_j]$ – допустимая величина запаса способностей по j-му параметру. В процессе оптимизации

станочной технологической системы стараются найти минимум указанного выражения [19].

Очевидно, что установление типа структуры параметрического ряда оказывает существенное влияние на запас способностей отдельных его членов. Так, для обеспечения максимальной эффективности гибридного металлообрабатывающего оборудования при его проектировании необходимо стремиться к такому построению технологической системы, при котором запас ее способностей имел бы наименьшее значение. Это требование достаточно хорошо выполняется и реализуется только в условиях массового типа производства. Однако в ситуации мелкосерийного и единичного производства фактор необходимого повышения гибкости технологического оборудования выходит на первый план, вынуждая создавать станки с увеличенным значением допустимой величины запаса способностей, что неизменно приводит к некоторому снижению их эффективности. Решением указанной проблемы, т. е. нахождением варианта наиболее рационального использования гаммы универсальных станков является равенство условных средних потерь для всех членов параметрического ряда

$$R_1 = R_2 = \ldots = R_i = \ldots = R_m = \text{const}, \qquad (2)$$

где m – количество членов типоразмерного ряда.

При формировании параметрических рядов металлообрабатывающих станков стандартизации подвергается их основной параметр. Например, для токарных станков это диаметр обработки над станиной, а для фрезерного металлообрабатывающего оборудования – ширина стола. В этом случае соотношение между основными параметрами соседних членов ряда и будет определять их нормативный запас способностей. Принимая во внимание данный факт, зависимость (1) может быть трансформирована в целевую функцию вида

$$R = \sum_{i=1}^{m} RC_i \left[1 - p\left\{ \frac{\varphi_i}{\varphi_i - 1}\left(1 - \Psi_i\right) \le 1 \right\} \right] \to \min, \quad (3)$$

где $\Psi = UC_i / DC_i$ – коэффициент использования способностей металлообрабатывающего станка.

Поскольку по мере роста основного параметра оборудования происходит увеличение приведенных затрат, то из анализа выражения (3) следует, что равенство условных средних потерь для всех станков гаммы можно обеспечить, если параметрический ряд будет построен с переменным знаменателем [19, 71]:

$$\varphi_1 > \varphi_2 > \ldots > \varphi_i > \ldots > \varphi_m. \qquad (4)$$

Необходимо отметить, что значения φ_i целесообразно изменять в геометрической прогрессии со знаменателем δ.

Дополнительным вариантом решения задачи обеспечения требования (2) для всех членов параметрического ряда является формирование условий, при которых размеры эксплуатируемых режущих инструментов или обрабатываемых деталей $\boldsymbol{X}$ будут приближены к максимально допустимым. Логическим следствием такого условия будет неизбежное уменьшение диапазонов варьирования D параметра $\boldsymbol{X}$ с увеличением габаритов технологического оборудования [19, 71]:

$$D_1 > D_2 > \ldots > D_i > \ldots > D_m. \qquad (5)$$

В свою очередь, способность предприятия достаточно быстро переходить на выпуск новой продукции на базе существующего оборудования (или по крайней мере с минимальной его заменой), т. е. мобильность станочного парка, также должна быть обеспечена при синтезе параметрических рядов. Это дополнительное условие достигается посредством перекрытия размерных диапазонов у отдельных членов параметрического ряда. Однако, как уже отмечалось ранее, многократное дублирование, значительно повышая затраты на изготовление и эксплуатацию станочного оборудования, по существу нивелирует все усилия, направленные на улучшение его мобильности.

Многочисленные статистические исследования в промышленно развитых странах показали, что распределения размеров инструментов и обрабатываемых на металлорежущих станках поверхностей обычно имеют одномодальный характер с положительной асимметрией. Доказано, что для станков определенного типоразмера параметр $\boldsymbol{X}$ обычно имеет логарифмически нормальное распределение [19, 20, 71, 72]:

$$f_i(y) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y - \overline{y_i})^2}{2\sigma_i^2}},$$

где y – натуральный логарифм случайной величины $\boldsymbol{X}$; $\overline{y_i}$ – среднее значение (математическое

ожидание) величины y; σ_i – среднеквадратичное отклонение y от $\overline{y_i}$.

Из анализа закономерности логнормального распределения (рис. 6) видно, что средняя часть диапазона является основной для i-го типоразмера оборудования, а боковые части служат для дублирования производственных функций смежных членов ряда.

Диапазон варьирования логарифмически нормального распределения целесообразно разбить на три примерно равных интервала (поддиапазона). Тогда в пределах среднего (основного) поддиапазона $\overline{a}_i$ будет обеспечиваться обработка с максимальной производительностью более 2/3 работ. На оба других дублирующих интервала, $a_{i\min}$ и $a_{i\max}$, будет отводиться оставшаяся треть работ (рис. 7). При этом возможно использование оборудования и за пределами данного размерного диапазона, но с некоторой потерей производительности в результате несоответствия технических характеристик станочных систем оптимальным условиям эксплуатации [19, 20, 71, 72].

Подобный принцип формирования параметрического ряда дает возможность производить обработку поверхности любого размера с максимальной производительностью, при этом имеет место трехкратное перекрытие диапазона.

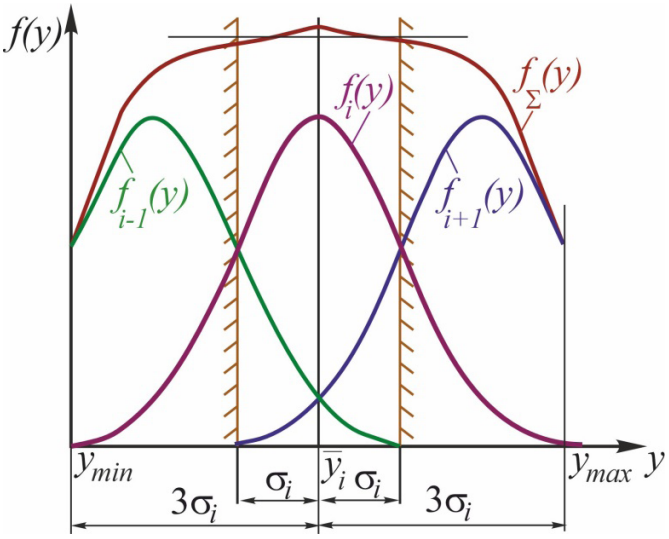


Рис. 6. Логарифмически нормальное распределение размеров инструментов и обрабатываемых на металлорежущих станках поверхностей

Fig. 6. Logarithmically normal distribution of tool sizes and surfaces machined on metal-cutting machines

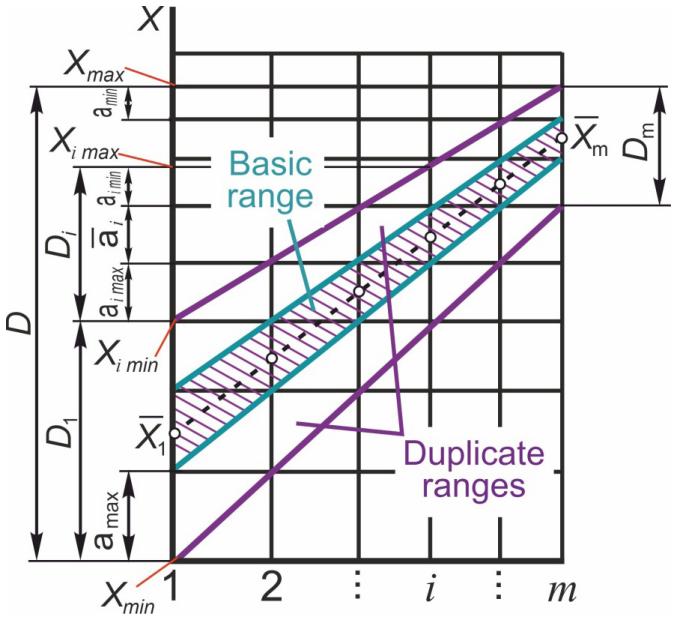


Рис. 7. Изображение предлагаемого параметрического ряда (в логарифмических координатах) с переменным знаменателем:

$a_{\max}$ и $a_{\min}$ – максимальный и минимальный размер интервала; $\overline{X}_1$ и $\overline{X}_m$ – средние значения параметра $\boldsymbol{X}$ для первого и m-го членов ряда

Fig. 7. Image of the proposed parameter-oriented series (in logarithmic coordinates) with a variable denominator:

$a_{\max}$ and $a_{\min}$ – the maximum and minimum size of the interval; $\overline{X}_1$ and $\overline{X}_m$ – the average values of the parameter $\boldsymbol{X}$ for the first and m^{th} members of the series

Результаты и их обсуждение

На первом этапе синтеза проводится анализ условий эксплуатации однотипных станков и устанавливается область их рационального использования, т. е. назначаются пределы $X_{\min}$ и $X_{\max}$ варьирования параметра $\boldsymbol{X}$. Определению же подлежат основные параметры $X_{\max\, i}$ и количество членов ряда m.

Первоначально назначают минимальный размер интервала и выбирают величину его приращения δ. На практике для обеспечения требуемой точности наиболее предпочтительными значениями являются $a_{\min} = 1,26$ с величиной приращения $\delta = 1,12$. Однако необходимо отметить, что в реальных условиях проектирования допустимы и другие варианты.

Представленные параметры связаны между собой следующим соотношением:

$$D = a_{\min}^{z} \delta^{(z^2 - z)/2}, \quad (6)$$

где z – количество интервалов случайной величины $\boldsymbol{X}$; $D = X_{\max}/X_{\min}$ – диапазон варьирования случайной величины $\boldsymbol{X}$.

Логарифмируя указанное выражение и решая его относительно z, находят количество членов параметрического ряда:

$$m = z - 2. \quad (7)$$

Затем устанавливают значения знаменателей ряда для каждого его члена

$$\varphi_i = a_{\min} \delta^{k_i}, \quad (8)$$

где $k_i = m - i$.

Анализируя полученные результаты, можно констатировать, что с увеличением порядкового номера члена ряда значение φ уменьшается, при этом нахождение основного параметра оборудования будет осуществляться по формуле

$$X_{\max\, i} = X_{\max} \Big/ \varphi_m^{k_i} \delta^{(k_i^2 - k_i)/2}, \quad (9)$$

где φ_m – минимальное значение переменного знаменателя ряда.

Величины базового (среднего) $\bar{a}_i$ и полного D_i диапазонов варьирования размера $\boldsymbol{X}$ каждого из членов параметрического ряда будут рассчитываться согласно следующим зависимостям: $\bar{a}_i = a_{\min} \delta^{k_i + 1}$ и $D_i = (\bar{a}_i)^3$.

По полученным данным на графике (рис. 8) наносят граничные линии размерных диапазонов, после чего приступают непосредственно к построению параметрического ряда. Для этого из точки A, соответствующей верхней границе основного поддиапазона первого члена ряда, проводится горизонтальная линия до ее пересечения в точке B с линией, определяющей нижнюю границу поддиапазона. Абсцисса точки B задает основной параметр второго члена ряда. Затем находится верхняя граница основного поддиапазона второго члена ряда (точка C), и процесс повторяется.

Полученные таким образом значения основных параметров следует привести к ближайшим стандартным. Это можно осуществить, незначительно изменив положение граничной линии минимальных значений размерной характеристики.

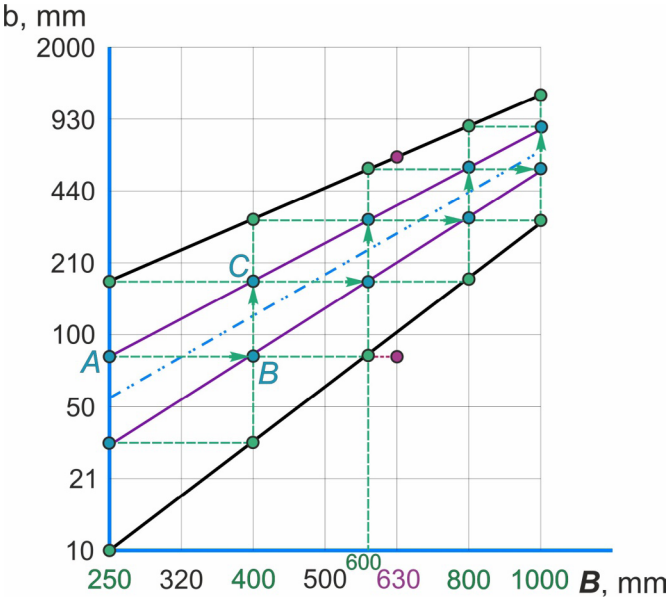


Рис. 8. Перспективный параметрический ряд вертикально-фрезерных станков с крестовым столом, модернизируемых до уровня гибридного технологического оборудования

Fig. 8. A promising parameter-oriented series of vertical milling machines with a cross table, upgraded to the level of hybrid technological equipment

Рассмотренный графоаналитический метод реализован при синтезе перспективного параметрического ряда вертикально-фрезерных станков с крестовым столом (ГОСТ 9726–89). Как показал анализ технических характеристик и условий эксплуатации отечественных фрезерных станков и их зарубежных аналогов, существует определенная корреляционная связь между предельными размерами обрабатываемых деталей и основным параметром оборудования:

$$b_{\max} = 0,4657 B^{1,1059}; \ \bar{b} = 0,0045 B^{1,7171}, \quad (10)$$

где $b_{\max}$ – максимальная ширина обрабатываемых заготовок на столе станка; $\bar{b}$ – средняя ширина заготовок; B – максимальная ширина рабочей поверхности фрезерного станка.

В результате анализа данных было зафиксировано, что прослеживается четкая тенденция к уменьшению диапазона варьирования размеров габаритов обрабатываемых изделий R_b по мере роста основного параметра станка B:

$$R_b = \frac{22\,082}{B^{1,3027}}. \quad (11)$$

В результате этого при эксплуатации вертикально-фрезерных станков действующего пара-

метрического ряда со знаменателем $\varphi = 1,26$ (ГОСТ 9726–89) [87] имеет место многократное перекрытие отдельных размерных диапазонов, достигающих в определенном интервале размеров девятикратной величины, что, безусловно, отражается на эффективности действующего станочного парка.

Новый параметрический ряд имеет в два раза меньше членов, определяемых ГОСТ 9726–89, и состоит из станков со следующими значениями основного параметра *B*: 250; 400; 630(600); 800; 1000 мм.

Если построить параметрический ряд на базе действующего, то переход на него может быть осуществлен с незначительными изменениями станкостроительного производства. Новыми являются лишь станки с *B* = 600 мм, созданные посредством минимальной модернизации существующего стандартного оборудования близких типоразмеров. Сократив, таким образом, номенклатуру выпускаемых и модернизируемых станков, получим возможность повышения серийности их производства и снижения текущих расходов на обслуживание и ремонтные работы, при этом сохраняется гибкость станочного парка. Для того чтобы сделать окончательные выводы об экономической целесообразности и эффективности применения предлагаемого параметрического ряда вместо традиционно используемого ранее, необходимо определить величины приведенных затрат для того и другого варианта. Ранее уже отмечалось, что наряду с основным параметром $X_{\max i}$ необходимо оптимизировать и другие основные технические характеристики оборудования. К ним относятся предельные значения частот вращения шпинделя, допустимый на нем крутящий момент и границы использования эффективной мощности. Даже при незначительном изменении структуры параметрического ряда автоматически возникает необходимость изменения указанных выше характеристик.

Обоснование технических характеристик на базе моделирования эксплуатационных параметров станочного оборудования с использованием предлагаемой методологии изложено авторами в работах [17, 19, 20, 71, 72, 75, 88]. В качестве эксплуатационных параметров рассматриваются характеристики приводов станка, значения которых зависят от режимов обработки, но при этом находятся в рамках диапазона технических характеристик. Поскольку диаметр режущего инструмента (например, диаметр торцевой фрезы) находится в жесткой взаимосвязи с шириной обрабатываемой заготовки, то подход к решению данной проблемы в своей основе имеет прогноз распределения системы указанных случайных величин. Значения распределений скоростей и сил резания при выполнении станком заданных функций являются исходными данными, которые получены статистическим путем при обработке соответствующей информации. В свою очередь, показатели распределения скоростей режущего инструмента, применяемого для обработки заготовки, и размер подвергаемого обработке изделия могут быть рассчитаны по следующим зависимостям:

$$\sigma_i = \frac{\ln \bar{a}_i}{2};$$

$$\overline{\ln X_i} = \ln X_{\max i} + (\ln \delta - 3\sigma_i);$$

$$\overline{X_i} = \exp\left\{\overline{\ln X_i} + \frac{\sigma_i^2}{2}\right\},$$

где σ_i – среднеквадратичное отклонение случайной величины $\boldsymbol{X}$; $\overline{\ln X_i}$ – среднее значение логарифма случайной величины $\boldsymbol{X}$; $\overline{X_i}$ – среднее значение величины $\boldsymbol{X}$.

Достаточно наглядно моделируемая система приведена на рис. 9, где она изображена в виде картины распределений. Здесь значения характеристик показаны в логарифмических координатах: по горизонтали отложены частоты вращения шпинделя *n*, по вертикали – крутящего момента *M*, а по диагонали – эффективной мощности *N*.

На рис. 9 отображаются линии равных вероятностей выполняемых на станке работ и наносятся оптимальные границы предельных значений моделируемых эксплуатационных характеристик. Они соответствуют крайним максимальным значениям второй производной дифференциальных функций $f(y)$ итоговых (результирующих) распределений характеристик *y* станка:

$$f(y) = \sum_{q=1}^{\omega} p_q f_q(y),$$

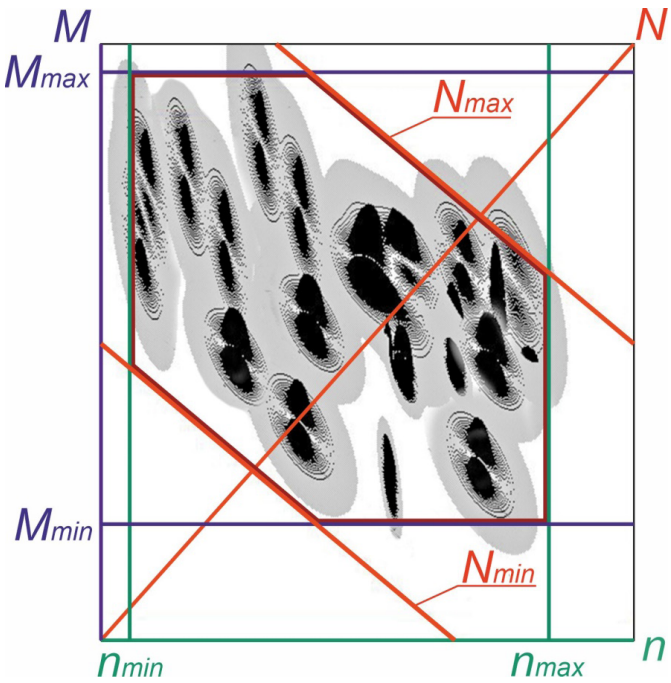


Рис. 9. Картина распределения эксплуатационных характеристик гибридного технологического оборудования

Fig. 9. The distribution pattern of the hybrid process equipment operational characteristics

где p_q – вероятность реализации условий обработки q; $f_q(y)$ – дифференциальная функция элементарного (частного) распределения характеристики для условия обработки q (y – натуральный логарифм n, M или N); ω – общее количество условий обработки на станке.

Предлагаемая методология отличается от традиционного подхода тем, что позволяет ввести ограничения минимума используемых значений мощности. Такая возможность существенно повышает средний коэффициент мощности двигателя ($\cos\varphi$) и снижает расход энергии.

Значения характеристик, полученные указанным способом, в дальнейшем при необходимости корректируются на основании стандартных рядов предпочтительных чисел, типовых значений мощности электродвигателей и др.

Поскольку оптимизация технических характеристик осуществляется по производительности станка, то значения этих характеристик на стадии моделирования для большего удобства выбираются в соответствии с результатами расчета процентной составляющей работ, выполняемых на станке при максимальной производительности с учетом установленных ограничений эксплуатационных параметров.

Заключение

Представлена оригинальная методика проведения структурно-кинематического анализа для предпроектных исследований гибридного металлообрабатывающего оборудования. Результаты исследований показали, что в большинстве случаев параметрические (типоразмерные) ряды металлорежущих станков общего назначения с постоянными знаменателями, построенные в соответствии с законом геометрической прогрессии, приводят к необходимости дублирования отдельных размерных диапазонов на станках одного ряда и, как следствие, к нецелесообразному увеличению количества его членов. В связи с этим растут расходы на проектные работы, изготовление и эксплуатирование оборудования. В случае применения параметрического ряда, построенного с использованием переменного знаменателя, достигается максимальная эффективность гибридного металлообрабатывающего оборудования, что теоретически доказано. Благодаря применению подобного принципа формирования параметрического ряда появляется возможность обеспечения практически равной вероятности обработки с максимальной производительностью поверхностей различных размеров при трехкратном перекрытии диапазонов.

Произведена апробация методики формирования структуры параметрических рядов. Установлено, что при эксплуатации вертикально-фрезерных станков действующего параметрического ряда со знаменателем $\varphi = 1,26$ (ГОСТ 9726–89) имеет место многократное перекрытие отдельных размерных диапазонов, достигающих в определенном интервале размеров девятикратной величины, что, безусловно, отражается на эффективности действующего станочного парка. Синтез перспективного параметрического ряда вертикального фрезерного станка с крестовым столом показал, что для нового параметрического ряда характерно наличие меньшего количества членов. Таким образом, применение предлагаемой методики позволяет сократить номенклатуру выпускаемых и модернизируемых станков, что в свою очередь приведет к повыше-

нию серийности производства, снижению затрат на ремонт и техобслуживание оборудования, но при этом позволит сохранить гибкость станочного парка.

Список литературы

1. *Hügel H., Wiedmaier M., Rudlaff T.* Laser processing integrated into machine tools – design, applications, economy // Optical and Quantum Electronics. – 1995. – Vol. 27, iss. 12. – P. 1149–1164. – DOI: 10.1007/BF00326472.

2. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials / K. You, G. Yan, X. Luo, M.D. Gilchrist, F. Fang // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 58. – P. 677–692. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.034.

3. *Anderson M.C., Shin Y.C.* Laser-assisted machining of an austenitic stainless steel: P550 // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2006. – Vol. 220, iss. 12. – P. 2055–2067. – DOI: 10.1243/09544054JEM562.

4. *Sun S., Brandt M., Dargusch M.S.* Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010. – Vol. 50, iss. 8. – P. 663–680. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.

5. *Макаров В.М., Лукина С.В.* Уникальная синергия гибридных станков // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2016. – № 8. – С. 18–25.

6. Curvature change in laser-assisted bending of Inconel 718 / J. Widłaszewski, M. Nowak, Z. Nowak, P. Kurp // Physical Sciences Forum. – 2022. – Vol. 4, iss. 1. – P. 26. – DOI: 10.3390/psf2022004026.

7. *Скиба В.Ю.* Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

8. *Борисов М.А., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С.* Гибридная технология электрохимической обработки сложнопрофильных изделий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 25–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.

9. *Sun S., Harris J., Brandt M.* Parametric investigation of laser-assisted machining of commercially pure titanium // Advances Engineering Materials. – 2008. – Vol. 10, iss. 6. – P. 565–572. – DOI: 10.1002/adem.200700349.

10. *Madhavulu G., Ahmed B.* Hot machining process for improved metal removal rates in turning operations // Journal of Materials Processing Technology. – 1994. – Vol. 44. – P. 199–206. – DOI: 10.1016/0924-0136(94)90432-4.

11. *Parida A.K., Maity K.* Experimental investigation on tool life and chip morphology in hot machining of Monel-400 // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2018. – Vol. 21, iss. 3. – P. 371–379. – DOI: 10.1016/j.jestch.2018.04.003.

12. *Özler L., İnan A., Özel C.* Theoretical and experimental determination of tool life in hot machining of austenitic manganese steel // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2001. – Vol. 41, iss. 2. – P. 163–172. – DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00077-8.

13. Study of burr width and height using ANOVA in laser hybrid micro milling of titanium alloy (Ti6Al4V) / S. Ul Hasan, S. Ali, S.H.I. Jaffery, E. Ud Din, A. Mubashir, M. Khan // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 21. – P. 4398–4408. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.051.

14. *Ding H., Shen N., Shin Y.C.* Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212, iss. 3. – P. 601–613. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.016.

15. *Bermingham M.J., Kent D., Dargusch M.S.* A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel // Wear. – 2015. – Vol. 328–329. – P. 518–530. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.03.025.

16. *Mohammadi H., Patten J.A.* Laser augmented diamond drilling: a new technique to drill hard and brittle materials // Procedia Manufacturing. – 2016. – Vol. 5. – P. 1337–1347. – DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.104.

17. *Скиба В.Ю., Иванцивский В.В.* Повышение эффективности поверхностно-термического упрочнения деталей машин в условиях совмещения обрабатывающих технологий, интегрируемых на единой станочной базе // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 45–71. – DOI: 10.17212/19946309202123.34571.

18. *Venkatesan K.* The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of inconel 718 using Nd:YAG laser source // Journal of Advanced Research. – 2017. – Vol. 8, iss. 4. – P. 407–423. – DOI: 10.1016/j.jare.2017.05.004.

19. *Skeeba V.Yu.* Parametric optimization of hybrid metalworking machinery quality // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 378. – P. 012030. – DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012030.

20. *Skeeba V.Yu., Skeeba P.Yu.* Determining the operational loads of the hybrid metalworking machines drive // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 378. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012031.

21. *Макаров В.М.* Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.

22. Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, May 26–28, 2008, Tokyo, Japan / M. Mitsuishi, K. Ueda, F. Kimura, eds. – London: Springer, 2008. – 556 p. – ISBN 978-1-84800-267-8. – DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.

23. *Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V.* Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 91. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

24. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. Mcintosh // CIRP Annals. – 2014. – Vol. 63, iss. 2. – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

25. *Garro O., Martin P., Veron M.* Shiva a multiarms machine tool // CIRP Annals. – Manufacturing Technology. – 1993. – Vol. 42, iss. 1. – P. 433–436. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.

26. *Brecher C., Özdemir D.* Integrative production technology: theory and applications. – [S. l.]: Springer International Publ., 2017. – 1100 p. – ISBN 978-3-319-47451-9. – ISBN 978-3-319-47452-6. – DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.

27. *Moriwaki T.* Multi-functional machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. Vol. 57, iss. 2. – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

28. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeeba, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.

29. *Yamazaki T.* Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 42. – P. 81–86. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

30. Laser assisted machining: a state of art review / G. Punugupati, K.K. Kandi, P.S.C. Bose, C.S.P. Rao // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 149. – P. 012014. – DOI: 10.1088/1757-899X/149/1/012014.

31. Cryogenic and hybrid induction-assisted machining strategies as alternatives for conventional machining of refractory tungsten and niobium / M. Olsson, V. Akujärvi, J.-E. Ståhl, V. Bushlya // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2021. – Vol. 97. – P. 105520. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105520.

32. *Ginta T.L., Amin A.K.M.N.* Thermally-assisted end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using induction heating // International Journal of Machining and Machinability of Materials. – 2013. – Vol. 14, iss. 2. – P. 194–212. – DOI: 10.1504/IJMMM.2013.055737.

33. *Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P.* The concept of hybrid manufacturing for high performance parts // South African Journal of Industrial Engineering. – 2012. – Vol. 23, iss. 2. – P. 106–115.

34. Densification, surface morphology, microstructure and mechanical properties of 316L fabricated by hybrid manufacturing / Y. Yang, Y. Gong, S. Qu, Y. Rong, Y. Sun, M. Cai // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 97, iss. 5–8. – P. 2687–2696. – DOI: 10.1007/s00170-018-2144-1.

35. Research of influence electric conditions combined electrodiamond processing by on specific consumption of wheel / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – P. 012081. – DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.

36. *Ding H.T., Shin Y.C.* Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010. – Vol. 50, iss. 1. – P. 106–114. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001.

37. *Иванцивский В.В., Скиба В.Ю.* Совмещение операций поверхностной закалки и финишного шлифования на одном технологическом оборудовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 1 (30). – С. 16–18.

38. *Скиба В.Ю., Иванцивский В.В.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование: повышение эффективности технологического процесса обработки деталей при интеграции поверхностной закалки и абразивного шлифования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 312 с. – ISBN 978-5-7782-3690-5.

39. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish / K.R. Berenji, U. Karagüzel, E. Özlü, E. Budak // CIRP Annals. – 2019. – Vol. 68, iss. 1. – P. 113–116. – DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.067.

40. Efficiency of hybrid equipment combining operations of surface hardening by high frequency currents and abrasive grinding / V.Yu. Skeeba, V.V. Ivancivsky, N.V. Vakhrushev, K.A. Parts, G.O. Cha // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194, iss. 2. – P. 022038. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022038.

41. *Salonitis K., Chondros T., Chryssolouris G.* Grinding wheel effect in the grind-hardening process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 38, iss. 1–2. – P. 48–58. – DOI: 10.1007/s00170-007-1078-9.

42. *Иванцивский В.В.*, *Скиба В.Ю.* Гибридное металлообрабатывающее оборудование. Технологические аспекты интеграции операций поверхностной закалки и абразивного шлифования: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 348 с. – ISBN 978-5-7782-3988-3.

43. Wear behavior of innovative niobium carbide cutting tools in ultrasonic-assisted finishing milling / J. Witte, D. Huebler, D. Schroepfer, A. Boerner, T. Kannengiesser // Wear. – 2023. – Vol. 522. – P. 204722. – DOI: 10.1016/j.wear.2023.204722.

44. Hybrid-hybrid turning of micro-SiCp/AA2124 composites: A comparative study of laser-and-ultrasonic vibration-assisted machining / J. Kim, L. Zani, A. Abdul-Kadir, A. Roy, K.P. Baxevanakis, L.C.R. Jones, V.V. Silberschmidt // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 86. – P. 109–125. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.045.

45. High-frequency electrical discharge assisted milling of Inconel 718 under copper-beryllium bundle electrodes / M. Xu, R. Wei, C. Li, T.J. Ko // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 85. – P. 1116–1132. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.026.

46. Numerical simulation and experimental investigation of structured surface generated by 3D vibration-assisted milling / B. Lv, B. Lin, Z. Cao, W. Liu, G. Wang // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 89. – P. 371–383. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.010.

47. *Jeon Y., Lee C.M.* Current research trend on laser assisted machining // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2012. – Vol. 13, iss. 2. – P. 311–317. – DOI: 10.1007/s12541-012-0040-4.

48. *Kim E.-J., Lee C.-M., Kim D.-H.* The effect of post-processing operations on mechanical characteristics of 304L stainless steel fabricated using laser additive manufacturing // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 1370–1381. – DOI: DOI.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.142.

49. *Ahn J.W., Woo W.S., Lee C.M.* A study on the energy efficiency of specific cutting energy in laser-assisted machining // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 94. – P. 748–753. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.129.

50. High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel / P. Dumitrescu, P. Koshy, J. Stenekes, M.A. Elbestawi // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2016. – Vol. 46, iss. 15. – P. 2009–2016. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.005.

51. *Venkatesan K., Ramanujam R., Kuppan P.* Laser assisted machining of difficult to cut materials: research opportunities and future directions – a comprehensive review // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 97. – P. 1626–1636. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.313.

52. Laser-assisted milling of advanced materials / C. Brecher, M. Emonts, C.-J. Rosen, J.-P. Hermani // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 599–606. – DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.076.

53. *Zaeh M.F., Wiedenmann R., Daub R.* A thermal simulation model for laser-assisted milling // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 5. – P. 353–362. – DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.062.

54. *Kim I.-W., Lee C.-M.* A study on the machining characteristics of specimens with spherical shape using laser-assisted machining // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 100. – P. 636–645. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.005.

55. *Choi Y.H., Lee C.M.* A study on the machining characteristics of AISI 1045 steel and inconel 718 with circular cone shape in induction assisted machining // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 34. – P. 463–476. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.023.

56. *Woo W.S., Lee C.M.* A study on the optimum machining conditions and energy efficiency of a laser-assisted fillet milling // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2018. – Vol. 5, iss. 5. – P. 593–604. – DOI: 10.1007/s40684-018-0061-2.

57. *Ha J.-H., Lee C.-M.* A study on the thermal effect by multi heat sources and machining characteristics of laser and induction assisted milling // Materials. – 2019. – Vol. 12, iss. 7. – P. 1032. – DOI: 10.3390/ma12071032.

58. *Kim E.J., Lee C.M.* A study on the optimal machining parameters of the induction assisted milling with Inconel 718 // Materials. – 2019. – Vol. 12, iss. 2. – P. 233. – DOI: 10.3390/ma12020233.

59. *Kim J.-H., Kim E.-J., Lee C.-M.* A study on the heat affected zone and machining characteristics of difficult-to-cut materials in laser and induction assisted machining // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 57. – P. 499–508. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.013.

60. *Kim E.-J., Lee C.-M.* Experimental study on power consumption of laser and induction assisted machining with Inconel 718 // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 59. – P. 411–420. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.064.

61. Investigation of surface integrity in laser-assisted machining of nickel based superalloy / D. Xu, Z. Liao, D. Axinte, J.A. Sarasua, R. M'Saoubi, A. Wretland // Materials and Design. – 2020. – Vol. 194. – P. 108851. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108851.

62. *Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V.* Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions // Metals. – 2021. – Vol. 11, iss. 9. – P. 1354. – DOI: 10.3390/met11091354.

63. Effects of laser-assisted grinding on surface integrity of zirconia ceramic / Z. Ma, Z. Wang, X. Wang, T. Yu // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, iss. 1. – P. 921–929. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.051.

64. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step "diamond smoothing" / V.Yu. Skeeba, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 25. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

65. *Gao K., Qin X.* Effect of feed path on the spot continual induction hardening for different curved surfaces of AISI 1045 steel // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 115. – P. 104632. – DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104632.

66. Predicting the induction hardened case in 42CrMo4 cylinder / M. Areitioaurtena, U. Segurajauregi, I. Urresti, M. Fisk, E. Ukar // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 87. – P. 545–550. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.034.

67. In-process residual stresses regulation during grinding through induction heating with magnetic flux concentrator / F. Li, X. Li, T. Wang, Y.(K.) Rong, S.Y. Liang // International Journal of Mechanical Sciences. – 2020. – Vol. 172. – P. 105393. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105393.

68. *Hammouma C., Zeroug H.* Enhanced frequency adaptation approaches for series resonant inverter control under workpiece permeability effect for induction hardening applications // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2022. – Vol. 27. – P. 101006. – DOI: 10.1016/j.jestch.2021.05.010.

69. Hybrid modeling of induction hardening processes / M.Z. Asadzadeh, P. Raninger, P. Prevedel, W. Ecker, M. Mücke // Applications in Engineering Science. – 2021. – Vol. 5. – P. 100030. – DOI: 10.1016/j.apples.2020.100030.

70. On the role of grain size on slurry erosion behavior of a novel medium-carbon, low-alloy pipeline steel after induction hardening / V. Javaheri, O. Haiko, S. Sadeghpour, K. Valtonen, J. Kömi, D. Porter // Wear. – 2021. – Vol. 476. – P. 203678. – DOI: 10.1016/j.wear.2021.203678.

71. Надежность прогноза качества технологического оборудования / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Ю.С. Чёсов, Е.В. Мережко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2 (59). – С. 33–38.

72. *Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V.* Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – Vol. 194, iss. 2. – P. 022037. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

73. *Федотенок А.А.* Кинематическая структура металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1970. – 408 с.

74. *Птицын С.В., Левицкий Л.В.* Структурный анализ и синтез кинематики металлорежущих станков. – Киев: УМК ВО, 1989. – 70 с.

75. Повышение эффективности проектирования гибридного металлообрабатывающего оборудования, объединяющего механическую и поверхностно-термическую операции: отчет о научно-исследовательской работе по проекту № 9.11829.2018/11.12 / В.Ю. Скиба, В.В. Иванцивский, О.В. Нос, Е.А. Зверев, Т.Г. Мартынова, Н.В. Вахрушев, Ю.В. Ванаг, К.А. Титова, Г.О. Ча, П.Ю. Скиба. – № ГР АААА-А18-118062290029-8. – Новосибирск, 2018. – 197 с.

76. *Казанцев М.Е.* Построение структурных схем станков и настройки исполнительных движений. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997. – 54 с.

77. *Ивахненко А.Г.* Повышение эффективности ранних стадий проектирования металлорежущих станков на основе структурного синтеза формообразующих систем: дис. … д-ра техн. наук. – М., 1998. – 244 с.

78. Effectiveness of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts, O.Y. Erenkov, E.O. Ivakhnenko, A.V. Oleinik // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, N 10. – P. 901–905. – DOI: 10.3103/S1068798X17100112.

79. *Ивахненко А.Г., Куц В.В.* Структурно-параметрический синтез технологических систем: монография. – Курск: Курский гос. техн. ун-т, 2010. – 151 с.

80. *Куц В.В.* Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. … д-ра техн. наук: 05.02.07 / Юго-Западный государственный университет. – Курск, 2012. – 365 с.

81. *Врагов Ю.Д.* Анализ компоновок металлорежущих станков: основы компонетики. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.

82. *Ивахненко А.Г.* Концептуальное проектирование металлорежущих систем. Структурный синтез. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 1998. – 124 с.

83. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–I – Analysis of requirements and specifications / M. Nakaminami, T. Tokuma, M. Moriwaki, K. Nakamoto // International Journal of Automation Technology. – 2007. – Vol. 1, N 2. – P. 78–86. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0078.

84. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–II – Investigation of basic structure / M. Nakaminami, T. Tokuma, K. Matsumoto, S. Sakashita, M. Moriwaki, K. Nakamoto // International Journal of Automation Technology. – 2007. – Vol. 1, N 2. – P. 87–93. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0087.

85. Introduction to precision machine design and error assessment / ed. by S. Mekid. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 302 p. – ISBN 0849378869. – ISBN 978-0849378867. – (Mechanical and Aerospace Engineering Series).

86. *Григорян Г.Д.* Надежность гибких технологических систем в условия безлюдной технологии. – Одесса: Изд-во ОПИ, 1985. – 104 с.

87. ГОСТ 9726–89. Станки фрезерные вертикальные с крестовым столом. Терминология. Основные размеры. Нормы точности и жесткости. – М.: Стандартинформ, 1989. – 41 с.

88. *Чёсов Ю.С., Птицын С.В.* Проектирование металлорежущего оборудования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 105 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

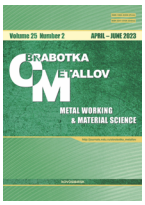
© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 2 pp. 45–67
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-45-67

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Hybrid technological equipment: on the issue of a rational choice of objects of modernization when carrying out work related to retrofitting a standard machine tool system with an additional concentrated energy source

Vadim Skeeba [a, *], *Egor Zverev* [1, b], *Pavel Skeeba* [2, c], *Aleksey Chernikov* [3, 1, d], *Andrey Popkov* [1, e]

[1] Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[2] JSC "Novosibirsk switch plant", 7 Aksenov str., Novosibirsk, 630025, Russian Federation
[3] LLC "GLK-Industrial Technologies", 177 Bolshevistskaya st., shop 16, Novosibirsk, 630083, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-8242-2295, skeeba_vadim@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0003-4405-6623, egor_z@ngs.ru,
[c] https://orcid.org/0000-0002-0327-992X, Pavel_skeeba_ptm@mail.ru, [d] https://orcid.org/0009-0006-9412-7687, aleksey.chernikov.97@mail.ru,
[e] https://orcid.org/0009-0006-5587-9990, andrej.popkov.2013@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 15 March 2023
Revised: 17 April 2023
Accepted: 15 May 2023
Available online: 15 June 2023

Keywords:
Hybrid equipment
Multipoint machining
High energy heating
Cutting
Induction hardening

Funding
This research was funded by Russian Science Foundation project N 23-29-00945, https://rscf.ru/en/project/23-29-00945/.

Acknowledgements
Researches were conducted at core facility of NSTU" Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. Improving the competitiveness of manufactured products is impossible without achieving high rates of resource and energy saving, while providing modern machine tools with the proper level of production flexibility in combination with guaranteed high values of processing productivity and the required level of parts manufacturing quality. Insufficient or excess capacity of technological equipment leads to a decrease in its economic efficiency, an increase in capital costs and, as a result, an increase in the cost of production. In the machine tool industry, which is a strategically significant and basic industry for the modernization of mechanical engineering, there is a special interest in the development of a new type of technological equipment that makes it possible to implement methods for modifying the surface layers of parts by processing it with concentrated energy sources. The combination of two processing technologies (mechanical and surface-thermal operations) in the conditions of integrated equipment makes it possible to level the shortcomings of monotechnologies and obtain new effects that are unattainable when using technologies separately. Ensuring an optimal level of quality — one of the unconditional requirements of a market economy — is a priority when developing the overall concept of technological equipment. Thus, it should be noted that the required and specific set of consumer properties are laid down during the design. And, therefore, the problem of quality optimization belongs to the field of forecasting and should be comprehensively addressed at the initial stage of developing the concept of technological equipment. The purpose of this research is to rationally choose the objects of modernization when carrying out work related to retrofitting a standard machine tool system with an additional concentrated energy source. **Methods:** Theoretical studies of the possible structural composition and layout of hybrid equipment during the integration of mechanical and surface-thermal processes were carried out taking into account the main provisions of structural synthesis and components of metal-cutting systems. During the research, issues related to the main provisions of system analysis, the geometric theory of surface formation, the design of metal-cutting equipment, methods of mathematical and computer modeling were raised. **Results and discussion.** Theoretical studies is found that currently, most of the parameter-oriented (dimension) series of general-purpose metal-cutting machines, built according to the law of geometric progression with a constant denominator, are the cause of multiple duplication of individual size ranges on machines of the same series. This gives grounds to talk about an unreasonable increase in the number of its members and, as a result, to an increase in the cost of designing, manufacturing and operating equipment. The authors adhere to the point of view that in order to ensure maximum efficiency of hybrid metal-cutting equipment, it is necessary to implement a parameter-oriented series built with a variable denominator. Such a principle of forming a parameter-oriented series makes it possible to provide an almost equal probability of processing a surface of any size with maximum productivity with a threefold overlap of ranges. Approbation of the technique for forming the structure of parametric series is carried out. It is theoretically proven that during the operation of vertical milling machines of the operating parameter-oriented series with the denominator $\varphi = 1.26$ (GOST 9726-89), there is a multiple overlap of individual size ranges, reaching a ninefold value in a certain range of sizes, which, of course, affects the efficiency of the existing machine tool holding. In turn, when synthesizing a promising parametric series of vertical milling machines with a cross table, it was shown that the new parameter-oriented series has a smaller number of members. Reducing the range of manufactured and modernized machine tools will increase the serial production and reduce current expenses on repairs and maintenance. Moreover, this effect is achieved while maintaining the flexibility of the machine tool holding.

For citation: Skeeba V.Yu., Zverev E.A., Skeeba P.Yu., Chernikov A.D., Popkov A.S. Hybrid technological equipment: on the issue of a rational choice of objects of modernization when carrying out work related to retrofitting a standard machine tool system with an additional concentrated energy source. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 45–67. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-45-67. (In Russian).

*** Corresponding author**
Skeeba Vadim Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa,
Novosibirsk, 630073, Russian Federation
Tel: 8 (383) 346-17-79, **e-mail:** skeeba_vadim@mail.ru

References

1. Hügel H., Wiedmaier M., Rudlaff T. Laser processing integrated into machine tools – design, applications, economy. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, vol. 27, iss. 12, pp. 1149–1164. DOI: 10.1007/BF00326472.

2. You K., Yan G., Luo X., Gilchrist M.D., Fang F. Advances in laser assisted machining of hard and brittle materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 677–692. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.034.

3. Anderson M.C., Shin Y.C. Laser-assisted machining of an austenitic stainless steel: P550. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2006, vol. 220, iss. 12, pp. 2055–2067. DOI: 10.1243/09544054JEM562.

4. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 8, pp. 663–680. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.04.008.

5. Makarov V.M., Lukina S.V. Unikal'naya sinergiya gibridnykh stankov [Unique synergy of hybrid machines]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2016, no. 8, pp. 18–25.

6. Widłaszewski J., Nowak M., Nowak Z., Kurp P. Curvature change in laser-assisted bending of Inconel 718. *Physical Sciences Forum*, 2022, vol. 4, iss. 1, p. 26. DOI: 10.3390/psf2022004026.

7. Skeeba V.Yu. Gibridnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya kompleksirovannykh metalloobrabatyvayushchikh stankov [Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

8. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Gibridnaya tekhnologiya elektrokhimicheskoi obrabotki slozhnoprofil'nykh izdelii [Hybrid technology of electrochemical processing of complex profiles]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 25–34. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.

9. Sun S., Harris J., Brandt M. Parametric investigation of laser-assisted machining of commercially pure titanium. *Advances Engineering Materials*, 2008, vol. 10, iss. 6, pp. 565–572. DOI: 10.1002/adem.200700349.

10. Madhavulu G., Ahmed B. Hot machining process for improved metal removal rates in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, vol. 44, pp. 199–206. DOI: 10.1016/0924-0136(94)90432-4.

11. Parida A.K., Maity K. Experimental investigation on tool life and chip morphology in hot machining of Monel-400. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2018, vol. 21, iss. 3, pp. 371–379. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.04.003.

12. Özler L., İnan A., Özel C. Theoretical and experimental determination of tool life in hot machining of austenitic manganese steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, iss. 2, pp. 163–172. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00077-8.

13. Ul Hasan S., Ali S., Jaffery S.H.I., Ud Din E., Mubashir A., Khan M. Study of burr width and height using ANOVA in laser hybrid micro milling of titanium alloy (Ti6Al4V). *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 4398–4408. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.051.

14. Ding H., Shen N., Shin Y.C. Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, iss. 3, pp. 601–613. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.016.

15. Bermingham M.J., Kent D., Dargusch M.S. A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel. *Wear*, 2015, vol. 328–329, pp. 518–530. DOI: 10.1016/j.wear.2015.03.025.

16. Mohammadi H., Patten J.A. Laser augmented diamond drilling: a new technique to drill hard and brittle materials. *Procedia Manufacturing*, 2016, vol. 5, pp. 1337–1347. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.104.

17. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V. Povyshenie effektivnosti poverkhnostno-termicheskogo uprochneniya detalei mashin v usloviyakh sovmeshcheniya obrabatyvayushchikh tekhnologii, integriruemykh na edinoi stanochnoi baze [Improving the efficiency of surface-thermal hardening of machine parts in conditions of combination of processing technologies, integrated on a single machine tool base]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 45–71. DOI: 10.17212/19946309202123.34571.

18. Venkatesan K. The study on force, surface integrity, tool life and chip on laser assisted machining of inconel 718 using Nd:YAG laser source. *Journal of Advanced Research*, 2017, vol. 8, iss. 4, pp. 407–423. DOI: 10.1016/j.jare.2017.05.004.

19. Skeeba V.Yu. Parametric optimization of hybrid metalworking machinery quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 378, p. 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012030.

20. Skeeba V.Yu., Skeeba P.Yu. Determining the operational loads of the hybrid metalworking machines drive. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 378, p. 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012031.

21. Makarov V.M. Kompleksirovannye tekhnologicheskie sistemy: perspektivy i problemy vnedreniya [Well integrated technological systems: prospects and problems of implementation]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2011, no. 6 (64), pp. 20–23.

22. Mitsuishi M., Ueda K., Kimura F., eds. *Manufacturing systems and technologies for the new frontier*: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, May 26–28, 2008, Tokyo, Japan. London, Springer, 2008. 556 p. ISBN 978-1-84800-267-8. DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.

23. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, p. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

24. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., Mcintosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63, iss. 2, pp. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

25. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multiarms machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1993, vol. 42, iss. 1, pp. 433–436. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.

26. Brecher C., Özdemir D. *Integrative production technology: theory and applications*. Springer International Publ., 2017. 1100 p. ISBN 978-3-319-47451-9. ISBN 978-3-319-47452-6. DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.

27. *Moriwaki T.* Multi-functional machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, iss. 2, pp. 736–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

28. Skeeba V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12. DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.

29. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 81–86. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

30. Punugupati G., Kandi K.K., Bose P.S.C., Rao C.S.P. Laser assisted machining: a state of art review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 149, p. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/149/1/012014.

31. Olsson M., Akujärvi V., Ståhl J.-E., Bushlya V. Cryogenic and hybrid induction-assisted machining strategies as alternatives for conventional machining of refractory tungsten and niobium. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, vol. 97, p. 105520. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105520.

32. Ginta T.L., Amin A.K.M.N. Thermally-assisted end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using induction heating. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2013, vol. 14, iss. 2, pp. 194–212. DOI: 10.1504/IJMMM.2013.055737.

33. Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P. The concept of hybrid manufacturing for high performance parts. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2012, vol. 23, iss. 2, pp. 106–115.

34. Yang Y., Gong Y., Qu S., Rong Y., Sun Y., Cai M. Densification, surface morphology, microstructure and mechanical properties of 316L fabricated by hybrid manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, iss. 5–8, pp. 2687–2696. DOI: 10.1007/s00170-018-2144-1.

35. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeeba V.Yu. Research of influence electric conditions combined electrodiamond processing by on specific consumption of wheel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 142, p. 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.

36. Ding H.T., Shin Y.C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 1, pp. 106–114. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001.

37. Ivancivsky V.V., Skeeba V.Yu. Sovmeshchenie operatsii poverkhnostnoi zakalki i finishnogo shlifovaniya na odnom tekhnologicheskom oborudovanii [Combining the operations of surface hardening and finish grinding on the same processing equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2006, no. 1 (30), pp. 16–18.

38. Skeeba V.Yu., Ivantsivsky V.V. *Gibridnoe metalloobrabatyvayushchee oborudovanie: povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei pri integratsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya* [Hybrid metal working equipment: improving the effectiveness of the details processing under the integration of surface quenching and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 312 p. ISBN 978-5-7782-3690-5.

39. Berenji K.R., Karagüzel U., Özlü E., Budak E. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish. *CIRP Annals*, 2019, vol. 68, iss. 1, pp. 113–116. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.067.

40. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Vakhrushev N.V., Parts K.A., Cha G.O. Efficiency of hybrid equipment combining operations of surface hardening by high frequency currents and abrasive grinding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194, iss. 2, p. 022038. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022038.

41. Salonitis K., Chondros T., Chryssolouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 38, iss. 1–2, pp. 48–58. DOI: 10.1007/s00170-007-1078-9.

42. Ivantsivsky V.V., Skeeba V.Yu. *Gibridnoe metalloobrabatyvayushchee oborudovanie. Tekhnologicheskie aspekty integratsii operatsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya* [Hybrid metal working equipment. Technological aspects of integrating the operations of surface hardening and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 348 p. ISBN 978-5-7782-3988-3.

43. Witte J., Huebler D., Schroepfer D., Boerner A., Kannengiesser T. Wear behavior of innovative niobium carbide cutting tools in ultrasonic-assisted finishing milling. *Wear*, 2023, vol. 522, p. 204722. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204722.

44. Kim J., Zani L., Abdul-Kadir A., Roy A., Baxevanakis K.P., Jones L.C.R., Silberschmidt V.V. Hybrid-hybrid turning of micro-SiCp/AA2124 composites: A comparative study of laser-and-ultrasonic vibration-assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 86, pp. 109–125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.045.

45. Xu M., Wei R., Li C., Ko T.J. High-frequency electrical discharge assisted milling of Inconel 718 under copper-beryllium bundle electrodes. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 85, pp. 1116–1132. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.12.026.

46. Lv B., Lin B., Cao Z., Liu W., Wang G. Numerical simulation and experimental investigation of structured surface generated by 3D vibration-assisted milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 89, pp. 371–383. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.010.

47. Jeon Y., Lee C.M. Current research trend on laser assisted machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, vol. 13, iss. 2, pp. 311–317. DOI: 10.1007/s12541-012-0040-4.

48. Kim E.-J., Lee C.-M., Kim D.-H. The effect of post-processing operations on mechanical characteristics of 304L stainless steel fabricated using laser additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, pp. 1370–1381. DOI: DOI.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.142.

49. Ahn J.W., Woo W.S., Lee C.M. A study on the energy efficiency of specific cutting energy in laser-assisted machining. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 748–753. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.129.

50. Dumitrescu P., Koshy P., Stenekes J., Elbestawi M.A. High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 46, iss. 15, pp. 2009–2016. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.005.

51. Venkatesan K., Ramanujam R., Kuppan P. Laser assisted machining of difficult to cut materials: research opportunities and future directions – a comprehensive review. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 97, pp. 1626–1636. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.313.

52. Brecher C., Emonts M., Rosen C.-J., Hermani J.-P. Laser-assisted milling of advanced materials. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.076.

53. Zaeh M.F., Wiedenmann R., Daub R. A thermal simulation model for laser-assisted milling. *Physics Procedia*, 2010, vol. 5, pp. 353–362. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.062.

54. Kim I.-W., Lee C.-M. A study on the machining characteristics of specimens with spherical shape using laser-assisted machining. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 100, pp. 636–645. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.005.

55. Choi Y.H., Lee C.M. A study on the machining characteristics of AISI 1045 steel and inconel 718 with circular cone shape in induction assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 34, pp. 463–476. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.06.023.

56. Woo W.S., Lee C.M. A study on the optimum machining conditions and energy efficiency of a laser-assisted fillet milling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2018, vol. 5, iss. 5, pp. 593–604. DOI: 10.1007/s40684-018-0061-2.

57. Ha J.-H., Lee C.-M. A study on the thermal effect by multi heat sources and machining characteristics of laser and induction assisted milling. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 7, p. 1032. DOI: 10.3390/ma12071032.

58. Kim E.J., Lee C.M. A study on the optimal machining parameters of the induction assisted milling with Inconel 718. *Materials*, 2019, vol. 12, iss. 2, p. 233. DOI: 10.3390/ma12020233.

59. Kim J.-H., Kim E.-J., Lee C.-M. A study on the heat affected zone and machining characteristics of difficult-to-cut materials in laser and induction assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 57, pp. 499–508. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.

60. Kim E.-J., Lee C.-M. Experimental study on power consumption of laser and induction assisted machining with Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 59, pp. 411–420. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.064.

61. Xu D., Liao Z., Axinte D., Sarasua J.A., M'Saoubi R., Wretland A. Investigation of surface integrity in laser-assisted machining of nickel based superalloy. *Materials and Design*, 2020, vol. 194, p. 108851. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108851.

62. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V. Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions. *Metals*, 2021, vol. 11, iss. 9, p. 1354. DOI: 10.3390/met11091354.

63. Ma Z., Wang Z., Wang X., Yu T. Effects of laser-assisted grinding on surface integrity of zirconia ceramic. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, iss. 1, pp. 921–929. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.051.

64. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V., Lobanov D.V., Zhigulev A.K., Skeeba P.Yu. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step "diamond smoothing*". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 25, p. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

65. Gao K., Qin X. Effect of feed path on the spot continual induction hardening for different curved surfaces of AISI 1045 steel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 115, p. 104632. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104632.

66. Areitioaurtena M., Segurajauregi U., Urresti I., Fisk M., Ukar E. Predicting the induction hardened case in 42CrMo4 cylinder. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 87, pp. 545–550. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.034.

67. Li F., Li X., Wang T., Rong Y.(K.), Liang S.Y. In-process residual stresses regulation during grinding through induction heating with magnetic flux concentrator. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, vol. 172, p. 105393. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105393.

68. Hammouma C., Zeroug H. Enhanced frequency adaptation approaches for series resonant inverter control under workpiece permeability effect for induction hardening applications. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2022, vol. 27, p. 101006. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.05.010.

69. Asadzadeh M.Z., Raninger P., Prevedel P., Ecker W., Mücke M. Hybrid modeling of induction hardening processes. *Applications in Engineering Science*, 2021, vol. 5, p. 100030. DOI: 10.1016/j.apples.2020.100030.

70. Javaheri V., Haiko O., Sadeghpour S., Valtonen K., Kömi J., Porter D. On the role of grain size on slurry erosion behavior of a novel medium-carbon, low-alloy pipeline steel after induction hardening. *Wear*, 2021, vol. 476, p. 203678. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203678.

71. Ptitsyn S.V., Skeeba V.Yu., Chesov Yu.S., Merezhko E.V. Nadezhnost' prognoza kachestva tekhnologicheskogo oborudovaniya [Reliability prediction of quality process equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2013, no. 2 (59), pp. 33–38.

72. Skeeba V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194, iss. 2, p. 022037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

73. Fedotenok A.A. *Kinematicheskaya struktura metallorezhushchikh stankov* [Kinematic structure of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 408 p.

74. Ptitsyn S.V., Levitskii L.V. *Strukturnyi analiz i sintez kinematiki metallorezhushchikh stankov* [Structural analysis and kinematics synthesis of machine tools]. Kiev, UMK Publ., 1989. 70 p.

75. Skeeba V.Yu., Ivantsivsky V.V., Nos O.V., Zverev E.A., Martynova T.G., Vakhrushev N.V., Vanag Yu.V., Titova K.A., Cha G.O., Skiba P.Yu. *Povyshenie effektivnosti proektirovaniya gibridnogo metalloobrabatyvayushchego oborudovaniya, ob"edinyayushchego mekhanicheskuyu i poverkhnostno-termicheskuyu operatsii* [Improving the efficiency of the conceptual design of the integrated metal-cutting equipment, combining mechanical and surface thermal operation]. Report on the research work of the project N 9.11829.2018/11.12. State registration no. AAAA-B19-219020690026-1, 2018. 197 p.

76. Kazantsev M.E. *Postroenie strukturnykh skhem stankov i nastroiki ispolnitel'nykh dvizhenii* [Construction of block diagrams of machine tools and adjustment of executive movements]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1997. 54 p.

77. Ivakhnenko A.G. *Povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya metallorezhushchikh stankov na osnove strukturnogo sinteza formoobrazuyushchikh sistem.* Diss. dokt. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the early stages of designing machine tools based on the structural synthesis of shaping systems. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 1998. 244 p.

78. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V., Erenkov O.Y., Ivakhnenko E.O., Oleinik A.V. Effectiveness of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 10, pp. 901–905. DOI: 10.3103/S1068798X17100112.

79. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. *Strukturno-parametricheskii sintez tekhnologicheskikh sistem* [Structural-parametric synthesis of technological systems]. Kursk, KurskSTU Publ., 2010. 151 p.

80. Kuts V.V. *Metodologiya predproektnykh issledovanii spetsializirovannykh metallorezhushchikh sistem.* Diss. dokt. tekhn. nauk [Methodology of pre-design studies of specialized metal-cutting systems. Dr. eng. sci. diss.]. Kursk, 2012. 365 p.

81. Vragov Yu.D. *Analiz komponovok metallorezhushchikh stankov (Osnovy komponetiki)* [Analysis of the layout of machine tools. The basics of compositing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 208 p.

82. Ivakhnenko A.G. *Kontseptual'noe proektirovanie metallorezhushchikh sistem. Strukturnyi sintez* [Conceptual design of metal-cutting systems. Structural synthesis]. Khabarovsk, KhGTU Publ., 1998. 124 p.

83. Nakaminami M., Tokuma T., Moriwaki M., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–I – Analysis of requirements and specifications. *International Journal of Automation Technology*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 78–86. DOI: 10.20965/ijat.2007.p0078.

84. Nakaminami M., Tokuma T., Matsumoto K., Sakashita S., Moriwaki T., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–II – Investigation of basic structure. *International Journal of Automation Technology*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 87–93. DOI: 10.20965/ijat.2007.p0087.

85. Mekid S., ed. *Introduction to precision machine design and error assessment. Mechanical and Aerospace Engineering Series.* Boca Raton, CRC Press, 2008. 302 p. ISBN 0849378869. ISBN 978-0849378867.

86. Grigoryan G.D. *Nadezhnost' gibkikh tekhnologicheskikh sistem v usloviya bezlyudnoi tekhnologii* [Reliability of flexible technological systems in the conditions of deserted technology]. Odessa, OPI Publ., 1985. 104 p.

87. GOST 9726–89. *Stanki frezernye vertikal'nye s krestovym stolom. Terminologiya. Osnovnye razmery. Normy tochnosti i zhestkosti* [State standard 9726–89. Vertical milling machines with compound table. Terminology. Basic dimensions. Standards of accuracy and rigidity]. Moscow, Standartinform Publ., 1989. 41 p.

88. Chesov Yu.S., Ptitsyn S.V. *Proektirovanie metallorezhushchego* oborudovaniya [Design of metal-cutting equipment]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2005. 105 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).