

УДК 669.02/09:004.15:658.58

doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-37-47

Размерный анализ технологических процессов восстановления деталей машин

Ю.А. Харламов¹, А.П. Жильцов², Д.А. Вишнеvский¹, А.В. Бочаров²

¹Донбасский государственный технический университет

²Липецкий государственный технический университет

Dimensional Analysis of Technological Processes for Reconditioning Machine Parts

Yu.A. Kharlamov¹, A.P. Zhiltsov², D.A. Vishnevsky¹, A.V. Bocharov²

¹Donbass State Technical University

²Lipetsk State Technical University

Восстановление изношенных деталей машин является существенным резервом повышения эффективности ремонтного производства. Восстановительные технологии необходимы не только для продления срока службы деталей, но и для повышения эффективности эксплуатации машин. Наибольшие затраты ресурсов ремонтного комплекса связаны с восстановлением размеров, расположения, формы и шероховатости изношенных поверхностей. При этом одновременно формируются и эксплуатационные свойства поверхностей, соответствующие их функциональному назначению, и прежде всего износостойкость и антифрикционность. Систематизированы основные способы размерного восстановления деталей машин. Получение требуемой геометрической точности восстанавливаемых поверхностей происходит последовательным приближением по мере выполнения операций и переходов восстановительной обработки. Экономное расходование материальных и трудовых ресурсов ремонтного комплекса можно обеспечить надлежащим выбором и контролем межоперационных размеров, получаемых на различных переходах механической обработки. Поэтому наряду с изучением физико-технологических возможностей способов восстановления становится актуальной проблема размерного анализа технологических процессов с обоснованным назначением припусков на переходы обработки восстанавливаемых поверхностей, толщины наносимых покрытий, их окончательных и промежуточных значений, размеров дополнительных ремонтных деталей и пр. Рассмотрены методы размерного восстановления деталей по виду технологических воздействий. Описаны методики определения оптимальных размеров детали на стадиях подготовки к размерному восстановлению, промежуточных и окончательных размеров на операциях обработки, а также толщины наносимых покрытий, обеспечивающих снижение энергетических, материальных и трудовых затрат, повышение качества и эксплуатационных свойств восстановленных деталей.

Ключевые слова: восстановительные покрытия, восстановление деталей, межоперационные размеры, метод ремонтных размеров, ремонтный комплекс, толщина покрытий

Reconditioning of worn-out machine components is a significant reserve for improving the efficiency of repair production. Recovery technologies are necessary not only to extend the service life of machine components, they also can improve the efficiency of machine operation. The greatest costs of the repair complex resources are associated with the restoration of

the size, spatial deviations, shape and roughness of worn surfaces. With that the operational properties of surfaces corresponding to their functional purpose, are formed simultaneously and first of all, wear resistance and antifricationality. The key methods of dimensional reconstruction of machine parts are systematized. The required geometric accuracy of the surfaces being restored is obtained by sequential approximation as the operations and stages of the restoration processing are performed. Saving material and labor resources of the repair complex can be ensured by the proper selection and control of the interoperative dimensions obtained at various machining steps. Therefore, along with the study of the physical and technological capabilities of restoration methods, the dimensional analysis of technological processes with a reasonable allowance setting for operating steps of processing the restored surfaces, the thickness of the applied coatings, their final and intermediate values, the size of additional repair parts, etc. becomes relevant. Methods of dimensional restoration of parts by the type of technological impacts are considered. The article describes methods for determining the optimal part dimensions at the stages of preparation for dimensional restoration, intermediate and final dimensions during processing operations, as well as the thickness of the applied coatings, which reduce energy, material and labor costs and improve the quality and operational properties of the restored parts.

Keywords: restoring coatings, restoration of parts, interoperative sizes, method of repair sizes, repair complex, coating thickness

Техническое обслуживание и ремонт в металлургической промышленности России являются одними из основных процессов как по доле себестоимости продукции (10...20 %), так и по количеству занятого персонала (до 30 %) [1]. Процессы выплавки чугуна и стали, предварительной и окончательной обработки слябов и других операций связаны со значительными циклическими динамическими силовыми и тепловыми воздействиями на детали технологического оборудования, что негативно сказывается на их эксплуатационных свойствах (ЭС) и сроке службы [2].

В результате детали и узлы металлургического оборудования подвергаются комбинированному действию различных видов изнашивания (механического, термического, усталостного, коррозионного, эрозийного и др.) [3, 4]. Изнашивающие воздействия влекут за собой образование в деталях разнообразных дефектов [5]. Наиболее распространенными дефектами являются потери размеров и геометрической формы поверхностей деталей и их взаимного расположения.

Ремонт деталей предназначен для устранения этих дефектов с технологическим обеспечением требуемых производственно-технических показателей качества [6] (точности размеров, формы, взаимного расположения поверхностей, параметров шероховатости и др.), полагая, что это гарантирует высокие ЭС исполнительных поверхностей деталей [7]. Однако детали, отремонтированные по разным технологиям и имеющие

близкие показатели качества, существенно различаются по ЭС [8].

Это зависит от используемых маршрутных технологических процессов ремонта, направленных на обеспечение заданных ЭС исполнительных поверхностей деталей [7]: износостойкости, контактной жесткости, прочности посадок с натягом, коррозионной стойкости, сопротивления усталости и др.).

На взаимосвязь многих ЭС деталей и узлов оборудования (как при изготовлении, так и при ремонте) влияют конструктивно-технологические и эксплуатационные факторы: стабильность условий эксплуатации, конструктивные особенности детали, точность назначения и выполнения размеров поверхностей и их взаимного расположения, использованные материалы, технологические процессы формообразования, качество поверхностей и др.

Восстановление изношенных деталей машин является существенным резервом повышения эффективности ремонтного производства [9]. Восстановительные технологии необходимы не только для продления срока службы деталей, но и для увеличения эффективности эксплуатации машин. Стоимость восстановления обычно не превышает 30...80 % стоимости новой детали. Современные восстановительные технологии и материалы позволяют повысить срок службы деталей по сравнению с новыми путем придания им улучшенных свойств.

Ремонтируемые и восстанавливаемые детали отличаются большим разнообразием и класси-

фицируются по многим признакам: функциональному назначению (в доменном производстве — конусы загрузочных устройств, шлаковые чаши и др.; в сталеплавильном производстве — кристаллизаторы и ролики машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), поддоны и др.; в прокатном производстве — валки, калибры, оправки и др.), материалам (основным и восстановительным), методам отбора ремонтных заготовок, методам и технологическим процессам устранения дефектов и др.

Массы и размеры деталей изменяются в широких пределах. Особенно значительные ресурсы расходуются на ремонт и восстановление размеров и формы поверхностей крупногабаритных массивных узлов и деталей. Кроме того, они создают значительные (в том числе встречные) грузопотоки в ремонтном комплексе (РК) и требуют больших временных затрат на перемещение и установку на станки РК в связи с необходимостью использования подъемно-транспортных средств [1]. Все эти факторы обуславливают актуальность поиска и использования путей уменьшения расхода ресурсов при восстановлении деталей.

Наибольшие затраты ресурсов связаны с восстановлением размеров, расположения, формы и шероховатости изношенных поверхностей. При этом одновременно формируются ЭС поверхностей, соответствующие их функциональному назначению, и прежде всего износостойкость и антифрикционность.

Наиболее часто для размерного восстановления деталей применяют метод ремонтных размеров, метод установки дополнительных ремонтных деталей (ДРД), метод нанесения восстановительного покрытия, технологию восстановления размерной точности деталей поверхностным пластическим деформированием с заданным перераспределением материала и комбинированные методы.

Методы ремонтных размеров и установки ДРД, несмотря на длительную историю использования, продолжают развиваться. Но наибольшее практическое применение в РК имеют способы нанесения достаточно толстых восстановительных слоев и покрытий — разнообразные технологии наплавки [9–12] и газотермического напыления [13–15].

При равном количестве прокатанного металла у наплавленных опорных валков износ намного меньше, чем у кованных и литых, а более равномерный профиль износа по длине

бочки валка позволяет уменьшить съём металла при переточках. Нарботка наплавленных валков на 1 мм износа (~48 000 т) на 25 % больше, чем у кованных, и в 2 раза больше, чем у литых. Стоимость восстановления составляет ~50 % стоимости нового валка.

Эти способы реализуются при использовании различных маршрутных технологических процессов, включающих в себя операции механической обработки для подготовки поверхностей к восстановительным воздействиям, а также последующего удаления дефектных поверхностных слоев и достижения необходимых точностных параметров.

Получение требуемой геометрической точности восстанавливаемых поверхностей происходит последовательным приближением по мере выполнения операций и переходов восстановительной обработки. Экономное расходование материальных и трудовых ресурсов РК можно обеспечить при надлежащем выборе и контроле межоперационных размеров, получаемых на различных переходах механической обработки. Это определяет актуальность разработки и совершенствования основ технологической подготовки производств по восстановлению деталей.

Технологическим особенностям восстановления деталей различными методами (главным образом их физико-технологическим возможностям) посвящено много работ [9, 11–14]. При этом весьма ограничено количество публикаций по размерному анализу восстановительных технологий, обоснованному назначению припусков на переходы обработки восстанавливаемых поверхностей и толщину наносимых покрытий, размеры ДРД, окончательные и промежуточные значения толщины покрытий и пр.

Отдельные вопросы проектирования технологических процессов восстановления нашли отражение в работах [16–18], большое развитие получили проблемы механической обработки восстановительных покрытий [9, 19, 20]. Однако проблема размерного анализа технологических процессов восстановления деталей лишь частично решена для отдельных технологических вариантов, известные решения не учитывают полного комплекса влияющих факторов.

Цель работы — систематизация и сопоставительный анализ методов размерного восстановления деталей по виду технологических воздействий, разработке методики определения

оптимальных размеров детали на стадиях подготовки к размерному восстановлению, промежуточных и окончательных размеров на операциях обработки, а также толщины наносимых покрытий, обеспечивающих снижение энергетических, материальных и трудовых затрат и повышение их качества и ЭС восстановленных деталей.

Определение промежуточных размеров в процессе восстановления деталей. При восстановлении несопрягаемых (свободных) поверхностей решается задача определения их размеров или толщины восстановительных покрытий с учетом припусков на последующую обработку. Существуют два варианта восстановления поверхностей сопрягаемых деталей. В первом варианте восстанавливают форму и размеры поверхностей обеих сопрягаемых деталей, во втором — у одной из деталей восстанавливают поверхность по методу ремонтных размеров, а у другой — размеры и форму под ремонтный размер сопрягаемой детали.

Для восстановления изношенных поверхностей необходимо назначить припуски, которые должны обеспечивать:

- удаление с изношенной поверхности отклонений ее геометрических параметров (формы, высотных параметров волнистости и шероховатости, неравномерности профиля поверхности вследствие износа, местных следов износа и пр.) и поверхностного слоя с эксплуатационными дефектами;

- соответствие получаемых после восстановления детали геометрических параметров требованиям ее последующей эксплуатации и требованиям к поверхности раздела между основным и восстановительным материалами;

- обеспечение параметров поверхности, способствующих требуемому взаимодействию с восстановительным слоем (прочности сцепления, натяга, коэффициента трения и пр.) путем выполнения операций по нарезанию резьбы, канавок, активации поверхности и др. [21, 22];

- минимально необходимые удаляемые слои основного и восстановительного материала.

Расчетные значения операционных припусков используют для нахождения размеров при подготовке ремонтных заготовок к операциям для восстановления, толщин наносимых восстановительных слоев и частично удаляемых при обработке, тем самым непосредственно определяя затраты ресурсов. Это усложнено

отсутствием единого подхода к расчету промежуточных припусков применительно к двум основным технологиям обеспечения точности механической обработки — методу пробных проходов и промеров и методу автоматического получения размеров [23].

В условиях РК для восстановления крупных единичных деталей предпочтительнее использовать метод пробных проходов и промеров. Кроме этих припусков для определения межоперационных размеров необходимы справочные данные о технологическом обеспечении параметров качества поверхностного слоя, маршрутном технологическом процессе, состоянии используемого оборудования и пр.

Для повышения качества восстанавливаемых поверхностей и уменьшения затрат ресурсов в ряде случаев целесообразно заменять практикуемые способы размерной обработки. Например, перспективно использовать точение для финишной обработки валков вместо шлифования [24]. Это также определяет возможность концентрации выполняемых переходов на станках и соответствующего уменьшения перемещений и установок деталей на станки.

Размерный анализ при восстановлении по методу ремонтных размеров. При обработке изношенных плоскостей под ремонтный размер минимальный припуск на первой операции (первом переходе)

$$Z_{1\min} = h_{yd} + Y_n + \varepsilon_1.$$

Здесь h_{yd} — толщина подлежащего удалению поверхностного слоя, $h_{yd} = Rz_n + Wz_n + h_n$, а общий припуск на обработку по всем переходам

$$Z_o = Rz_n + Wz_n + h_n + Y_n + \varepsilon_1 + \sum_{i=2}^n [(Rz + h)_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_{y i}],$$

где Rz_n и Wz_n — высотные параметры шероховатости и волнистости изношенной поверхности; h_n — глубина дефектного поверхностного слоя, образовавшегося при эксплуатации детали (включая локальные дефекты и отклонения по глубине следов износа и др.); Y_n — глубина профиля износа; ε_1 — погрешность установки ремонтной заготовки на первом переходе обработки данной поверхности; n — число переходов обработки, определяемое

требуемой точностью поверхности и принятым маршрутом обработки; Rz_{i-1} , h_{i-1} и ρ_{i-1} — соответственно высотные параметры шероховатости, глубина дефектного поверхностного слоя и суммарные значения пространственных отклонений, оставшихся от предшествующей обработки; ε_{yi} — погрешность установки ремонтной заготовки на переходах обработки.

Под знаком суммы в последнем выражении учтены данные по следующим переходам выбранного маршрутного процесса обработки восстанавливаемой поверхности.

Между размерами поверхностей — исходной изношенной и полученной при первом переходе обработки (или нескольких для полного удаления изношенного поверхностного слоя) — соблюдается соотношение

$$H_{i\min} - H_{1\min} = Z_{1\min},$$

где $H_{i\min}$ и $H_{1\min}$ — минимальные размеры изношенной поверхности и поверхности после первого перехода обработки.

Тогда максимальный размер поверхности после первого перехода обработки

$$H_{1\max} = H_{i\min} + TN_i,$$

где TN_i — допуск на размер изношенной поверхности H_i .

Предельно допустимый ремонтный размер

$$\left(H_{д.о} - \sum_{j=1}^m Z_{о.ж} \right) \geq H_{д.кр},$$

где $H_{д.о}$ — начальный (конструкторский) размер детали; m — количество ремонтных размеров; $Z_{о.ж}$ — общий припуск на обработку под j -й ремонтный размер; $H_{д.кр}$ — предельно возможный минимальный размер детали по условиям напряженно-деформированного состояния, конструктивным требованиям и пр.

При надлежащей организации эксплуатации можно принять значения общих припусков на обработку под ремонтные размеры одинаковыми. Тогда можно записать

$$m \leq \frac{H_{д.о} - H_{д.кр}}{Z_{о.ср}},$$

где $Z_{о.ср}$ — среднее значение припусков обработки под ремонтный размер.

Для цилиндрических поверхностей

$$2Z_{1\min} = 2(Rz_i + Wz_i + h_i + Y_i + \varepsilon_1).$$

Общий припуск с учетом последующих переходов обработки

$$2Z_o = 2 \left\{ Rz_i + Wz_i + h_i + Y_i + \varepsilon_1 + \sum_{i=2}^n [(Rz + h)_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_{yi}] \right\}.$$

Соответствующие соотношения промежуточных размеров для наружных цилиндрических поверхностей имеют вид

$$D_{i\min} - D_{1\min} = 2Z_{1\min};$$

$$D_{i\max} = D_{1\min} + 2TD_i,$$

где $D_{i\min}$ и $D_{1\min}$ — минимальные диаметры изношенной поверхности и поверхности после первого перехода обработки; $D_{i\max}$ — максимальный диаметр изношенной поверхности; TD_i — допуск на диаметр изношенной поверхности D_i (или погрешности ее определения).

При восстановлении внутренних цилиндрических поверхностей максимальный диаметр поверхности после первого перехода обработки

$$D_{1\max} - D_{i\max} = 2Z_{1\min}.$$

Размерный анализ при восстановлении по методу замены или установки ДРД. В случае значительного износа поверхность подвергают механической обработке, трансформируя в сопрягаемую, и устанавливая на нее ДРД, размеры которой компенсируют износ и припуски на обработку вновь формируемой поверхности сопряжения. Отдельно изготавливают ДРД, которую после установки на сопрягаемую поверхность подвергают обработке для достижения требуемых геометрических параметров детали.

Крупные массивные детали часто выполняют составными, когда одна из частей (менее металлоемкая с быстроизнашиваемой поверхностью) выполнена съемной и ее сопряжение с основой предусмотрено начальной конструкцией детали, например, бандажированные прокатные валки и ролики МНЛЗ.

Механической обработке подвергают две поверхности на ДРД — основную быстроизнашиваемую и сопрягаемую с основной деталью.

Минимальная толщина ДРД для плоской поверхности

$$H_{0\min} = Rz_{\max} + h_{\text{и}} + Y_{\text{и}} + \varepsilon_1 + h_{\text{пр.с}} + \sum_{i=2}^n [(Rz + h)_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_{y_i}] + k_1 k_2 R_{\min} + C \geq H_{kr\min},$$

где Rz_{\max} — максимальный высотный параметр шероховатости; $h_{\text{пр.с}}$ — толщина промежуточного слоя (соединительного, демпфирующего и пр.); k_1 — коэффициент, учитывающий необходимость увеличения ресурса работы детали; k_2 — коэффициент, учитывающий повышение износостойкости ДРД по сравнению с таковой для основного материала детали; R_{\min} — регламентируемое допустимое значение износа, обеспечивающее требуемый ресурс работы детали; C — дополнительная величина, учитывающая необходимость получения толщины ДРД, соответствующей конструктивно-технологическим требованиям; $H_{kr\min}$ — минимально допустимая конструктивная толщина ДРД.

Промежуточный размер на обработку изношенной поверхности основной детали под установку (сопряжение) ДРД

$$H_{\text{сопр min}} = L_{\min} - H_{0\min},$$

где L_{\min} — минимальный конструкторский размер поверхности.

Минимальная толщина стенки ДРД (втулки) для восстановления наружной цилиндрической поверхности

$$H_{0\min} = Rz_{\max} + h_{\text{и}} + \sqrt{Y_{\text{и}}^2 + \varepsilon_1^2} + h_{\text{пр.с}} + \sum_{i=2}^n [(Rz + h)_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_{y_i}^2}] + k_1 k_2 R_{\min} + C \geq H_{kr\min}.$$

Для цилиндрических деталей минимальный диаметр изношенной поверхности после обработки под установку (сопряжение) втулки

$$D_{\text{сопр min}} = D_{\text{кmin}} - 2H_{0\min},$$

где $D_{\text{кmin}}$ — минимальный конструкторский размер поверхности.

Размерный анализ при восстановлении детали нанесением покрытий. Практически на всех металлургических предприятиях широко используют методы наплавки восстановительных и упрочняющих слоев на крупногабаритные стальные детали оборудования (прокатные валки, ролики МНЛЗ, моталок и рольгангов и др.). Расширяется применение газотермических методов напыления покрытий (на плиты кристаллизаторов МНЛЗ, фурмы доменных печей и др.). Поэтому необходимо совершенствовать

технологии восстановления размеров и геометрии деталей.

При изготовлении и восстановлении деталей с покрытиями возможны различные требования к маршрутным технологиям, гарантирующим необходимые соотношения размеров и допусков поверхностей с покрытиями.

Обеспечение требуемой толщины покрытия в процессе его нанесения с заданным на нее допуском. Если размеры поверхности — свободные или с широким допуском на размер, превышающим толщину покрытия, то ее минимальное значение должно удовлетворять условию

$$H_{\min} \geq H_{\text{пер}} + H_{cr} + R_{\min},$$

где $H_{\text{пер}}$ — толщина переходного слоя между покрытием и основой, во многом зависящая от способов подготовки поверхности основы; H_{cr} — минимальная критическая толщина покрытия, гарантирующая его работоспособность; R_{\min} — толщина слоя покрытия на износ, достаточная для обеспечения его требуемого ресурса (при необходимости), $R_{\min} = v_{\text{и}} T_{\text{р}}$ ($v_{\text{и}}$ — скорость изнашивания; $T_{\text{р}}$ — требуемый ресурс работы покрытия).

В этом случае к микрогеометрии и размерам поверхности покрытия особых требований не предъявляют и его не подвергают размерной обработке. Покрытие может пройти упрочняющую обработку (термическую, химико-термическую, пропитку и пр.). В таком варианте технологии контролируют только толщину покрытия, как правило, неразрушающими методами.

Обеспечение требуемой толщины и параметров микрогеометрии при обработке покрытия после его нанесения. В этом случае минимальная толщина наносимого покрытия определяется следующими выражениями:

- для плоской поверхности

$$H_{\min} \geq H_{\text{пер}} + H_{cr} + R_{\min} + \rho_{\text{осн}} + \sum_{i=1}^n [(Rz + h)_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_{y_i}];$$

- для цилиндрической поверхности

$$2H_{\min} \geq 2 \left\{ H_{\text{пер}} + H_{cr} + R_{\min} + \rho_{\text{осн}} + \sum_{i=1}^n [(Rz + h)_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_{y_i}^2}] \right\},$$

где $\rho_{\text{осн}}$ — пространственные отклонения поверхности, подготовленной к нанесению покрытия.

При использовании методов обработки, обеспечивающих съём материала покрытия в слое, параллельном поверхности раздела с основной, значениями ρ и ε пренебрегают.

Обеспечение требуемого размера поверхности с заданным допуском без каких-либо требований к толщине покрытия после его окончательной обработки. В этом случае минимальная толщина наносимого покрытия на плоскую поверхность

$$H_{\min} = (L_d - L_{\text{осн}}) + H_{cr} + \rho_{\text{осн}} + \varepsilon_1 + H_{\text{пер}} + \sum_{i=2}^n Z_{i\min},$$

где L_d — требуемый размер поверхности после обработки покрытия; $L_{\text{осн}}$ — размер поверхности перед нанесением покрытия; $Z_{i\min}$ — минимальный припуск на i -й операции (переходе) обработки покрытия.

В таких случаях контроль размера поверхности под покрытие существенного значения не имеет. Более важно обеспечить параметры поверхности, гарантирующие эффективное схватывание с наносимым покрытием и высокую прочность сцепления.

Для цилиндрических поверхностей справедливо выражение

$$2H_{\min} = 2 \left\{ (L_d - L_{\text{осн}}) + H_{cr} + \sqrt{\rho_{\text{осн}}^2 + \varepsilon_1^2} + H_{\text{пер}} + \sum_{i=2}^n Z_{i\min} \right\}.$$

Обеспечение заданного размера восстанавливаемой поверхности после окончательной обработки покрытия с одновременным ограничением его максимально допустимой остаточной толщины $H_{\text{остmax}}$, т. е. при условии $H_{\text{остmax}} \leq H_{cr}$. Такое восстановление размера также бывает необходимо при нанесении многослойных покрытий, например, при наплавке валков слоями с различными значениями модулей упругости при контрастном изменении свойств слоев [11, 12].

В этом случае для плоской поверхности минимальный размер ремонтной заготовки, обработанной перед нанесением покрытия,

$$L_{\text{оснmin}} = L_{i\min} - Y_{\text{и}} - Rz_{\text{и}} - h_{\text{и}} - \varepsilon_1 - TL_{\text{осн}} - \sum_{i=2}^n Z_{\text{осн}i\min},$$

где $L_{i\min}$ — минимальный размер изношенной поверхности; $TL_{\text{осн}}$ — допуск на размер ремонтной заготовки, обработанной под покрытие; $Z_{\text{осн}i\min}$ — припуски на переходы обработки.

Минимальная толщина наносимого покрытия

$$H_{\min} = H_{\text{остmin}} + TL_{\text{осн}} + TL_d + \sum_{j=1}^m Z_{\text{покр}j\min},$$

где $H_{\text{остmin}}$ — минимальная остаточная толщина покрытия после размерной обработки; TL_d — допуск на размер детали с покрытием; m — число переходов размерной обработки покрытия; $Z_{\text{покр}j\min}$ — припуск на j -й переход обработки покрытия.

Аналогичным образом можно получить выражения для определения промежуточных размеров при восстановлении цилиндрических поверхностей.

Восстановление детали (например, наплавленного прокатного валка) нанесением покрытия, подвергаемых многократному восстановлению по методу межремонтных размеров. В этом случае минимальная толщина наносимого покрытия

$$H_{\min} = H_{\text{остmin}} + TL_{\text{осн}} + Z_o + (k+1)v_{\text{изн}}T_{\text{м.р}} + k(Z_{\text{м.р}} + TL_{\text{м.р}}),$$

где k — количество ремонтных размеров; $v_{\text{изн}}$ — скорость изнашивания покрытия; $T_{\text{м.р}}$ — длительность межремонтного периода; $Z_{\text{м.р}}$ — общий припуск на обработку покрытия под ремонтный размер; $TL_{\text{м.р}}$ — допуск на ремонтный размер.

Выводы

1. Размерный анализ технологических процессов восстановления размеров и формы деталей позволяет выбрать и уточнить способ и операционные процессы обработки как при подготовке ремонтных заготовок к восстановительным воздействиям, так и при обработке восстановительных слоев независимо от метода их получения.

2. Расчетно-аналитические методы определения промежуточных припусков на выполнение операций и переходов при восстановлении деталей способствуют назначению рациональных значений толщины восстановительных слоев деталей и минимальных припусков на обработку, тем самым уменьшая материальные, энергетические и трудовые затраты.

3. Снижение затрат на перемещение и установку на станки РК может быть достигнуто выбором рациональных значений показателей

точности обработки восстанавливаемых поверхностей на промежуточных этапах технологического процесса, а также использованием многооперационных станков и сокращением разнообразностей применяемых методов обработки.

Литература

- [1] Золотарев А.В., Кондаков А.И. Характерные дефекты деталей металлургического оборудования и технологическое обеспечение их ремонта на примере машин непрерывной разливки стали. *Справочник. Инженерный журнал с приложением*, 2013, № 11, с. 38–42.
- [2] Сидоров В.А., Ошовская Е.В. Особенности проявления и выявления поломок металлургических машин. *Захист металургійних машин від поломок. Міжвуз. темат. зб. наук. пр. Мариуполь*, 2000, № 5, с. 14–19.
- [3] Касаткин Н.Л. *Ремонт и монтаж металлургического оборудования*. Москва, Металлургия, 1970. 312 с.
- [4] Бобров В.В., Коваленко В.Д., Михайлусь А.С., Мойсеенко И.И., Потапов В.С., Сичевой А.П. *Улучшение эксплуатационных свойств деталей прокатного оборудования*. Киев, Техніка, 1988. 158 с.
- [5] Золотарев А.В. Научно-методическая база технологического обеспечения эксплуатационных свойств роликов установок непрерывной разливки стали при их ремонте. *Справочник. Инженерный журнал с приложением*, 2014, № 12, с. 39–45.
- [6] Суслов А.Г., Дальский А.М. *Научные основы технологии машиностроения*. Москва, Машиностроение, 2002. 684 с.
- [7] Суслов А.Г. *Качество поверхностного слоя деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2000. 320 с.
- [8] Суслов А.Г., ред. *Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений*. Москва, Машиностроение, 2006. 448 с.
- [9] Иванов В.П., ред. *Восстановление деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2003. 673 с.
- [10] *Repair and maintenance weld overlay solutions for steel mills*. URL: <https://pdfslide.net/reader/f/repair-and-maintenance-weld-overlay-solutions-for-and-maintenance-weld-overlay> (дата обращения 15 декабря 2020).
- [11] Лещинский Л.К., Самогутин С.С. *Слоистые наплавленные и упрочненные композиции*. Мариуполь, Новый мир, 2005. 392 с.
- [12] Иванов В.П., Степнова Ю.А. Совершенствование технологии наплавки габаритных валков горячей прокатки гетерогенным рабочим слоем. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*, 2015, № 31, с. 98–105.
- [13] Matthews S., James B. Review of thermal spray coating applications in the steel industry. Part 1 — Hardware in steel making to the continuous annealing process. *J. Therm. Spray Tech.*, 2010, vol. 19, no. 6, pp. 1267–1276, doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9518-8>
- [14] Kay C.M. Thermal spray applications in the steel industry. *ASM handbook. Vol. 5A. Thermal spray technology*. ASM International, 2013, pp. 324–327.
- [15] Schneider K.E., Belashchenko V., Dratwinski M., Siegmann S., Zagorski A. *Thermal spraying for power generation components*. Wiley, 2006. 271 p.
- [16] Ситников А.А., Собачкин А.В., Камышов Ю.Н. Проектирование технологических процессов изготовления и ремонта деталей с износостойкими покрытиями. *Наукоемкие технологии в машиностроении*, 2019, № 2, с. 29–36.
- [17] Харламов Ю.А. Методика расчета толщины покрытия. *Сварочное производство*, 1987, № 9, с. 9–11.
- [18] Трифионов Г.И., Жачкин С.Ю. Толщина покрытия детали при плазменном напылении. *Современные материалы, техника и технологии*, 2018, № 1(16), с. 77–82.
- [19] Харламов Ю.О., Клименко С.А., Будаг'янец М.А., Полонський Л.Г. *Обробка деталей при відновленні і зміцненні*. Луганськ, Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. 500 с.

- [20] Дианов А.А. *Технологическое обеспечение качества деталей с износостойкими покрытиями за счет управления параметрами точности основы и покрытия*. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2010. 16 с.
- [21] Шоршоров М.Х., Кудинов В.В., Харламов Ю.А. Состояние и перспективы развития нанесения покрытий распылением. *Физика и химия обработки материалов*, 1977, № 5, с. 13–24.
- [22] Харламов Ю.А., Борисов Ю.С. Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями. *Автоматическая сварка*, 2001, № 6, с. 19–25.
- [23] Лищенко Н.В., Ларшин В.П., Макаров С.Н. Анализ способов определения припуска на механическую обработку. *Труды Одесского политехнического университета*, 2011, № 1(35), с. 38–44.
- [24] Бурькин В.В. Финишная технология обработки прокатных валков восстановленных наплавкой. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, 2018, № 80, с. 91–99.

References

- [1] Zolotarev A.V., Kondakov A.I. Characteristic defects of metallurgical equipment parts and technological provision for their repair an example of continuous casting machines. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2013, no. 11, pp. 38–42 (in Russ.).
- [2] Sidorov V.A., Oshovskaya E.V. Special aspects of break-down emergence and revealing in metallurgic machines. *Zakhist metalurgiyikh mashin vid polomok: mizhvuz. Temat. zb. nauk. pr.* [Protecting Metallurgic Machines from Breakdowns. Interacademic Coll. Works.]. Mariupol', 2000, no. 5, pp. 14–19 (in Russ.).
- [3] Kasatkin N.L. *Remont i montazh metallurgicheskogo oborudovaniya* [Repair and assembling of metallurgic equipment]. Moscow, Metallurgiya publ., 1970. 312 p.
- [4] Bobrov V.V., Kovalenko V.D., Mikhaylus' A.S., Moyseenko I.I., Potapov V.S., Sichevoy A.P. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh svoystv detaley prokatnogo oborudovaniya* [Improving exploitation properties of rolling equipment parts]. Kiev, Tekhnika publ., 1988. 158 p.
- [5] Zolotarev A.V. Scientific and methodological base for technology provision of continuous casting rollers operational properties at repair. *Handbook. An Engineering Journal with Appendix*, 2014, no. 12, pp. 39–45 (in Russ.).
- [6] Suslov A.G., Dal'skiy A.M. *Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Scientific basis of machine building technology]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2002. 684 p.
- [7] Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin* [Surface layer quality of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2000. 320 p.
- [8] *Tekhnologicheskoe obespechenie i povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv detaley i ikh soedineniy* [Engineering support and improving exploitation properties of parts and its assemblies]. Ed. Suslov A.G. Moscow, Mashinostroenie publ., 2006. 448 p.
- [9] *Vosstanovlenie detaley mashin* [Machine parts recovery]. Ed. Ivanov V.P. Moscow, Mashinostroenie publ., 2003. 673 p.
- [10] *Repair and maintenance weld overlay solutions for steel mills*. Available at: <https://pdfslide.net/reader/f/repair-and-maintenance-weld-overlay-solutions-for-and-maintenance-weld-overlay> (accessed 15 December 2020).
- [11] Leshchinskiy L.K., Samotugin S.S. *Sloistye naplavlennyye i uprochnennyye kompozitsii* [Layered welded and strengthened compositions]. Mariupol', Novyy mir publ., 2005. 392 p.
- [12] Ivanov V.P., Stepnova Yu.A. Improving the technology of surfacing heterogeneous working layer on hot rolling bulky rolls. *Reporter of The Priazovskiy State Technical University. Section: Technical Sciences*, 2015, no. 31, pp. 98–105 (in Russ.).
- [13] Matthews S., James B. Review of thermal spray coating applications in the steel industry. Part 1 — Hardware in steel making to the continuous annealing process. *J. Therm. Spray Tech.*, 2010, vol. 19, no. 6, pp. 1267–1276, doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9518-8>

- [14] Kay C.M. Thermal spray applications in the steel industry. *ASM handbook. Vol. 5A. Thermal spray technology*. ASM International, 2013, pp. 324–327.
- [15] Schneider K.E., Belashchenko V., Dratwinski M., Siegmann S., Zagorski A. *Thermal spraying for power generation components*. Wiley, 2006. 271 p.
- [16] Sitnikov A.A., Sobachkin A.V., Kamyshev Yu.N. Design of engineering processes for manufacturing and repair of parts with wear-resistant coatings. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2019, no. 2, pp. 29–36 (in Russ.).
- [17] Kharlamov Yu.A. Computation method for coating thickness. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1987, no. 9, pp. 9–11 (in Russ.).
- [18] Trifonov G.I., Zhachkin S.Yu. Thickness of plasma-sputtered coating on a detail. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2018, no. 1(16), pp. 77–82 (in Russ.).
- [19] Kharlamov Yu.O., Klimenko S.A., Budag'yants M.A., Polons'kii L.G. *Obrobka detaley pri vidnovlenni i zmitsnenni* [Parts processing at recovery and strengthening]. Lugans'k, Vidvo SNU im. V. Dalya publ., 2007. 500 p.
- [20] Dianov A.A. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detaley s iznosostoykimi pokrytiami za schet upravleniya parametrami tochnosti osnovy i pokrytiya*. Avtoref. Kand. Diss. [Technological ways to provide quality of parts with wear-resistance coatings by controlling accuracy parameters of base and coating. Abstract Cand. Diss.]. Barnaul, AltGTU im. I.I. Polzunova publ., 2010. 16 p.
- [21] Shorshorov M.Kh., Kudinov V.V., Kharlamov Yu.A. State and prospects of coatings sputtering development. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 1977, no. 5, pp. 13–24 (in Russ.).
- [22] Kharlamov Yu.A., Borisov Yu.S. Effect of surface micro-relief on adhesion strength with gas-thermal coatings. *Avtomaticheskaya svarka*, 2001, no. 6, pp. 19–25 (in Russ.).
- [23] Lishchenko N.V., Larshin V.P., Makarov S.N. Analysis of methods for determining the allowances for machining. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 1(35), pp. 38–44 (in Russ.).
- [24] Burykin V.V. Finishing processing technology for rolling mills, recovered by welding deposition. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii*, 2018, no. 80, pp. 91–99 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.01.2021

Информация об авторах

ХАРЛАМОВ Юрий Александрович — доктор технических наук, профессор кафедры машины металлургического оборудования. ГОУ ВО Луганской народной республики «Донбасский государственный технический университет» (94204, Алчевск, Луганская народная республика, Проспект Ленина, д. 16, e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com).

ЖИЛЬЦОВ Александр Павлович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургического оборудования. ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (398055, Липецк, Российская Федерация, ул. Московская, д. 30, e-mail: zhiltsov_ap@mail.ru).

ВИШНЕВСКИЙ Дмитрий Александрович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машины металлургического комплекса». ГОУ ВО Луганской народной республики «Донбасский государственный технический университет» (94204, Алчевск, Луганская народная республика, Проспект Ленина, д. 16, e-mail: dimavish.79@mail.ru).

БОЧАРОВ Александр Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры металлургического оборудования. ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (398055, Липецк, Российская Федерация, ул. Московская, д. 30, e-mail: alor_fr@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Харламов Ю.А., Жильцов А.П., Вишнеvский Д.А., Бочаров А.В. Размерный анализ технологических процессов восстановления деталей машин. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 5, с. 37–47, doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-37-47

Please cite this article in English as:

Kharlamov Yu.A., Zhiltsov A.P., Vishnevsky D.A., Bocharov A.V. Dimensional Analysis of Technological Processes for Reconditioning Machine Parts. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 5, pp. 37–47, doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-37-47

Information about the authors

KHARLAMOV Yuriy Aleksandrovich — Doctor of Sciences (Eng.), Professor, the Department of Machines of the Metallurgical Complex. Donbass State Technical University (94204, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Lenin Avenue, 16, e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com).

ZHILTSOV Alexander Pavlovich — Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Metallurgical Equipment. Lipetsk State Technical University (398055, Lipetsk, Russian Federation, Moskovskaya St., 30, e-mail: zhiltsov_ap@mail.ru).

VISHNEVSKY Dmitry Aleksandrovich — Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Machines of the Metallurgical Complex. Donbass State Technical University (94204, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Lenin Avenue, 16, e-mail: dimavish.79@mail.ru).

BOCHAROV Alexandr Viktorovich — Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Department of Metallurgical Equipment. Lipetsk State Technical University (398055, Lipetsk, Russian Federation, Moskovskaya str., 30, e-mail: alor_fr@mail.ru).