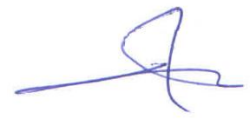


На правах рукописи



АЛЬ-КАДХИМИ МОХАММЕД ФАЙЯДХ ДЖАССАМ

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ
ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Специальность 2.5.5. Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2022

Работа выполнена на кафедре «Инновационные технологии в машиностроении» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Табакон Владимир Петрович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Инновационные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск

Официальные оппоненты: **Макаров Владимир Федорович**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь

Мигранов Марс Шарифуллович
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

Ведущая организация **ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск**

Защита состоится «01» марта 2022 г., в 14-00, на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.001.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32, и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ»), почтовый адрес: 445667, ГСП, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14); по адресу: г. Ульяновск, Северный Венец, 32, главный учебный корпус, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета, адрес сайта: www.ulstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н., доцент



Веткасов Н.И.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сверление отверстий является одной из самых распространённых операций механической обработки в современном машиностроительном производстве. Процесс сверления протекает в сложных условиях, связанных с затрудненным теплоотводом и отводом стружки из зоны обработки. Одновременная работа большого числа режущих кромок и наличие поперечной кромки, которая сминает металл, усложняет процесс стружкообразования при сверлении и вызывают интенсивный износ инструмента. Повышение эффективности процесса сверления можно добиться путем нанесения на контактные площадки сверл износостойких покрытий (ИП), которые находят очень широкое применение.

Несмотря на определенные успехи, достигнутые в области разработки и применения ИП для режущего инструмента, остаются нерешенными вопросы, связанные с влиянием ИП на функциональные процессы резания при сверлении, не раскрыто влияние ИП на тепловое состояние спиральных сверл с покрытием. Не раскрыто влияние ИП на контактные процессы при сверлении и интенсивность изнашивания спиральных сверл. Отсутствуют данные о влиянии многослойных покрытий (МП) на процесс резания спиральными сверлами, формировании таких покрытий для сверл.

На данный момент отсутствует методика оценки теплового состояния спиральных сверл с ИП, учитывающая особенности процесса сверления, рекомендации по формированию архитектуры МП – по толщине слоев и их взаимному расположению, общей толщине МП. Поэтому можно утверждать, что настоящее диссертационное исследование, посвященное повышению работоспособности спиральных сверл путем разработки и применения МП, является актуальным.

Цель работы:

Повышение работоспособности спиральных сверл путем разработки и применения МП.

Объектом исследований является процесс сверления спиральными сверлами с износостойкими покрытиями.

Предметом исследований являются закономерности взаимосвязи состава и конструкции износостойких покрытий с функциональными параметрами процесса сверления и работоспособностью спиральных сверл.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Выявлены доли деформационно-силовой нагрузки, приходящиеся на главные и вспомогательные режущие кромки и поперечную кромку для сверл без покрытия и с ИП различного состава.

2. Разработана методика расчета тепловых полей в режущих клиньях спирального сверла, учитывающая долю деформационно-силовой нагрузки, приходящейся на различные кромки сверла.

3. Исследованы структурные параметры и механические свойства ИП, выбранные в качестве функциональных слоев МП и установлено влияние состава ИП на функциональные параметры процесса сверления.

4. На основе комплексной оценки результатов численного моделирования теплового состояния режущего клина инструмента, влияния состава ИП на функциональные параметры процесса сверления, механических свойств ИП и интенсивности изнашивания спиральных сверл предложены архитектуры МП для спиральных сверл.

5. На основе выявленных взаимосвязей структурных параметров и механических свойств ИП и интенсивности изнашивания сверл разработаны конструкции МП для спиральных сверл и технологические режимы их нанесения.

6. Экспериментально показана высокая работоспособность сверл с разработанными МП, подтвержденная опытно-промышленными испытаниями в условиях действующего производства.

Научную новизну имеют следующие разработки:

1. Методика расчета тепловых полей в режущих клиньях спирального сверла, учитывающая доли деформационно-силовой нагрузки, приходящиеся на главные и вспомогательные режущие и поперечную кромки.

2. Результаты численного моделирования теплового состояния спирального сверла, позволившие выявить влияние ИП на процесс теплообразования на режущих и поперечной кромках.

3. Закономерности влияния конструкции МП на параметры структуры, механические свойства и интенсивность изнашивания спиральных сверл.

4. Математические модели периода стойкости спиральных сверл с разработанными МП.

Практическую ценность имеют следующие разработки:

1. Рекомендации по формированию архитектуры МП спиральных сверл, соотношению толщин слоёв и общей толщины покрытия, обеспечивающих высокую работоспособность инструмента.

2. Технологические параметры процесса нанесения МП: компоновочные схемы, время осаждения слоёв, опорное напряжение, ток дуги, ток фокусирующих катушек.

Опытно-промышленные испытания, выполненные в производственных условиях АО «Ульяновский механический завод» (г. Ульяновск), подтвердили высокую работоспособность спиральных сверл с разработанными МП. Результаты исследований включены в учебный процесс подготовки магистров по направлению 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты теоретико-экспериментальных исследований работоспособности спиральных сверл с различными покрытиями, в частности методику расчета тепловых полей в режущих клиньях спирального сверла и закономерности влияния состава ИП на контактные процессы при сверлении.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния конструкции МП на их структурные параметры, механические свойства и интенсивность изнашивания спиральных сверл.

3. Технологические режимы нанесения МП на спиральные сверла.

4. Результаты экспериментальных исследований работоспособности спиральных сверл с разработанными ИП при сверлении отверстий в заготовках из низколегированных нормализованных сталей и результаты опытно-промышленных испытаний.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на 3 научно-технических конференциях, на научно-техническом семинаре кафедры «Инновационные технологии в машиностроении» (УлГТУ, г. Ульяновск).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 2 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ и 1 статья в издании из базы цитирования Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (183 наименования) и двух приложения, включает 137 страниц машинописного текста, 37 рисунков и 24 таблицы.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, её практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены особенности процесса резания и пути повышения эффективности режущего инструмента на операциях сверления заготовок. Рассмотрены основные современные методы нанесения ИП на режущие инструменты. Показано, что наиболее эффективными являются методы физического осаждения покрытий (ФОП), в частности метод КИБ. На основе анализа работ отечественных и зарубежных исследователей показана эффективность применения ИП для различных режущих инструментов. Проанализировано влияние условий процесса резания на изнашивание и работоспособность режущих инструментов с ИП. Показано, что основной причиной потери работоспособности режущего инструмента с ИП является разрушение ИП в результате образования в нем трещин, являющихся следствием влияния теплосиловых нагрузок и адгезионно-усталостных процессов. Отмечены нерешенные вопросы, связанные с отсутствием данных о влиянии ИП, в том числе и МП, на работоспособность, тепловое состояние режущих клиньев спирального сверла и методики оценки распределения температурных полей в режущем клине инструмента. В заключение сформулированы цель и задачи настоящей работы.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований параметров структуры и механических свойств однослойных ИП, используемых в качестве функциональных слоев МП, исследований процесса сверления спиральными сверлами с данными ИП. Представлена общая методика проведения экспериментальных исследований и технология нанесения износостойких покрытий.

Структурные параметры (период кристаллической решетки a , полуширину рентгеновской линии β_{111}) и остаточные напряжения σ_0 ИП исследовали методами рентгеновской дифрактометрии на установке ДРОН-3М,

микротвердость H_{μ} и модуль Юнга E – с использованием пирамиды Кнуппа на микротвердомере Mitutoyo NH-125 (Япония). Трещиностойкость оценивали по критическому коэффициенту интенсивности напряжений K_{IC} , определяемому методом вдавливания алмазного индентора Виккерса с использованием твердомера ТК-2М при нагрузке 600 Н. Прочность адгезионной связи ИП с инструментальной основой оценивали методом вдавливания алмазного конического индентора Роквелла с использованием твердомера ТК-2М. Функциональные параметры процесса резания при сверлении: крутящего момента $M_{кр}$ и осевой силы резания P_o , измеряли с использованием динамометра УДМ-600 и многоканального цифрового осциллографа подключенного через аналогово-цифровой преобразователь. Работоспособность сверл оценивали по периоду стойкости при сверлении заготовок из нормализованной стали 30ХГСА (HRC 30-32).

Износостойкие покрытия TiN, TiAlN и TiAlCrN наносили на установке «Булат – 6» на цельно-твердосплавные сверла из однокарбидного твердого сплава производства фирмы «DORMER» (Германия) стандартной геометрии, диаметром 5 мм, диаметром сердцевины 0,8 мм. При нанесении использовали катоды из титана (титанового сплава BT1-0), литые катоды из сплава титана и алюминия и составные катоды из титана со вставкой из хрома или циркония.

Исследовали фазовый состав, структурные параметры и механические свойства однослойных ИП, выбранных в качестве функциональных слоев ИП. Установлено, что все покрытия являются однофазными с ГЦК-решеткой, аналогичной решетки нитрида титана, при переходе от одноэлементного покрытия TiN к многоэлементным покрытиям TiAlN и TiAlCrN имеет место снижение периода кристаллической решетки, повышение полуширины рентгеновской линии и величины сжимающих остаточных напряжений (табл. 1).

1. Структурные параметры и механические свойства однослойных покрытий

Покр- тие	a , нм	β_{111} , град	σ_0 , МПа	K_o	H_{μ} , ГПа	K_{IC}	E , ГПа	H_{μ} / E	H_{μ}^3 / E^2 , ГПа
TiN	0,4235	0,5	– 775	1,1	27,8	3,39	307	0,090	0,228
TiAlN	0,4228	0,67	– 902	0,9	30,5	4,07	387	0,079	0,189
TiAlCrN	0,4221	0,74	– 1472	1,25	35,4	4,18	403	0,087	0,273

Наиболее высокие механические свойства имеют трехэлементные покрытия TiAlCrN, микротвердость и модуль упругости которых выше по сравнению с покрытием TiN в 1,2 раза и 1,3 раза соответственно (табл. 1). Наибольшую прочность адгезии с инструментальной основой имеет двухэлементное покрытие TiAlN.

Исследовали крутящий момент $M_{кр}$ и осевую силу P_o (табл. 2) при сверлении заготовок специальной конструкции, позволяющей оценить указанные параметры на различных кромках спирального сверла. Установлено, что нанесение покрытий в наибольшей степени снижает величины $M_{кр}$ и P_o на вспомогательных режущих кромках. По сравнению со сверлом без покрытия осевая сила

уменьшилась в 2,9-3,1 раза, а крутящий момент – в 2-3 раза в зависимости от состава покрытия. Наблюдаемое наибольшее снижение величин $M_{кр}$ и P_o на вспомогательных режущих кромках связано с тем, что величина данных параметров определяется силами трения, действующими на вспомогательных режущих кромках, которые снижаются при нанесении покрытий.

2. Влияние покрытий на осевую силу и крутящий момент

Покрытие	$M_{кр}, Нм / P_o, Н$ на кромках сверла			суммарные $M_{кр}, Нм / P_o, Н$
	главные режущие	вспомогательные режущие	поперечная кромка	
Без покрытия	0,16 / 260	0,04 / 46	0,10 / 178	0,30 / 484
TiN	0,10 / 187	0,01 / 17	0,08 / 152	0,19 / 356
TiAlN	0,10 / 192	0,012 / 21	0,08 / 160	0,192 / 373
TiAlCrN	0,12 / 188	0,017 / 27	0,083 / 168	0,22 / 383

Примечание: $V = 25$ м/мин, $S_o = 0,09$ мм/об

На главной режущей кромке и поперечной кромках снижение указанных параметров существенно ниже – на главной режущей кромке оно составило 18,2 % для P_o и 15,3-18,4 % для $M_{кр}$, на поперечной кромке – соответственно от 7,6 % до 15,4 % и от 2 % до 11,2 % в зависимости от состава покрытия и режима резания.

Исследованиями выявлена тенденция небольшого роста $M_{кр}$ и P_o (не более 6 %) при переходе от одноэлементного покрытия TiN к многоэлементным TiAlN и TiAlCrN.

Установлено, что соотношение величин $M_{кр}$ и P_o , действующих на разных кромках сверла для сверл с покрытиями и без покрытия, практически остается без изменения. При этом, наибольшая доля $M_{кр}$ и P_o приходится на главные режущие кромки. Например, для сверл без покрытия доля P_o составила 54 %, а $M_{кр}$ – 55 %. Для сверл с покрытиями доля P_o составила от 55% до 58 %, а $M_{кр}$ – от 57% до 59 % в зависимости от состава покрытия. Доля $M_{кр}$ и P_o , приходящаяся на поперечную кромку, меньше, чем на главных режущих кромках. Так для сверл без покрытия доля $M_{кр}$ составила 30 %, P_o – 32 %, для сверл с покрытиями – соответственно 36 % и 35 % в зависимости от состава покрытия. Наименьшая доля $M_{кр}$ и P_o приходится на вспомогательные режущие кромки.

Таким образом, проведенные исследования показали, что нанесение покрытий изменяет функциональные параметры процесса сверления заготовок. При этом наибольшее влияние покрытий на данные параметры проявляется на вспомогательных режущих кромках и наименьшее – на поперечной кромке.

В третьей главе предложен принцип формирования и выбора состава функциональных слоев МП спиральных сверл, разработана методика и проведено численное моделирование теплового состояния рабочих элементов спиральных сверл с однослойными ИП. Предложены архитектуры МП, представлены технология нанесения МП, результаты исследований параметров структуры, механических свойств МП и интенсивности изнашивания спиральных

сверл с разработанными МП, на основе которых определена конструкция МП – общая толщина и соотношение толщин функциональных слоев.

Результаты исследований функциональных параметров процесса сверления, представленные в гл. 2, выявили идентичность влияния покрытий на контактные характеристики процесса резания при сверлении и непрерывном продольном точении. Поэтому для формирования МП для спиральных сверл был выбран принцип их построения для условий непрерывного резания. Для окончательного выбора составов функциональных слоев МП и формирования архитектуры МП провели численное моделирование теплового состояния спиральных сверл с ИП.

Численное моделирование теплового состояния рабочих элементов спиральных сверл с однослойными износостойкими покрытиями проводили в два этапа. На первом этапе была определена интенсивность тепловыделения $q(\psi)$ и её распределение на контактных площадках сверла, на втором – построение температурных полей в режущем клине спирального сверла.

Интенсивность тепловыделения $q(\psi)$ на контактных площадках спирального сверла рассчитывали по формуле:

$$q(d) = \frac{dQ(x)}{dx} = c_3 d \cdot \delta(d). \quad (1)$$

где $\frac{dQ(x)}{dx}$ – тепловыделение на любом участке кромки dx , кал; $c_3 d$ – безразмерный коэффициент¹; $\delta(d)$ – угол резания на участке кромки, град.

Для стандартных сверл при отсутствии подточки передней поверхности $\delta(d) \approx \arctg D/d \cdot \sin\varphi/\operatorname{tg}\beta$ ¹. Учитывая это, интенсивность тепловыделения q , кал/(см·сек) может быть определена:

$$q(d) = c_3 d \cdot \arctg D/d \cdot \sin\varphi/\operatorname{tg}\beta. \quad (2)$$

где D – номинальный диаметр сверла, мм; d – переменный диаметр сверла на любом участке кромки, мм; β – угол спирали на периферии инструмента, град.

Вместе с этим в работе² показано, что с достаточной для практики точностью выражение (2) можно аппроксимировать зависимостью:

$$q(\psi) = q_0(1 - e^{-m\psi}), \quad (3)$$

где $\psi = d/D$ – безразмерный параметр, m – поправочный коэффициент, а q_0 , кал/(см·сек) – интенсивность тепловыделения, может быть определена как:

$$q_0 = 3,74 \cdot 10^{-3} (nM_{кр}/D), \quad (4)$$

¹ Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.

² Юджовский П.А. Исследование тепловых явлений, износа и стойкости инструмента при сверлении: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: Куйбышев, 1965. – 18 с.

где n – частота вращения сверла, об/мин; $M_{кр}$ – крутящий момент при сверлении, Нм; D – номинальный диаметр сверла, мм.

Используя полученные данные по величинам крутящего момента $M_{кр}$, был проведен расчет интенсивности тепловыделения q_0 , Вт/м \cdot 10 $^{-3}$ для главных, вспомогательных режущих кромок – $q_{0вк}$ и поперечной кромки – $q_{0пк}$, сверла без покрытия и с покрытиями TiN, TiAlN, TiAlCrN (табл. 3) и получено их распределение вдоль главных режущих кромок сверла l от центра сверла к его периферии (рис. 1).

3. Результаты расчета интенсивности тепловыделения q_0

Покрытие	Интенсивность тепловыделения q_0 на кромках сверла, Вт/м \cdot 10 $^{-3}$		
	главные режущие, q_0 , Вт/м \cdot 10 $^{-3}$	вспомогательные режущие $q_{0вк}$, Вт/м \cdot 10 $^{-3}$	поперечная кромка $q_{0пк}$, Вт/м \cdot 10 $^{-3}$
Без покрытия	191,5	2,0	5,0
TiN	119,7	0,5	4,0
TiAlN	120,0	0,6	4,0
TiAlCrN	143,6	0,9	4,2

Примечание: $V = 10$ м/мин, $S_0 = 0,1$ мм/об

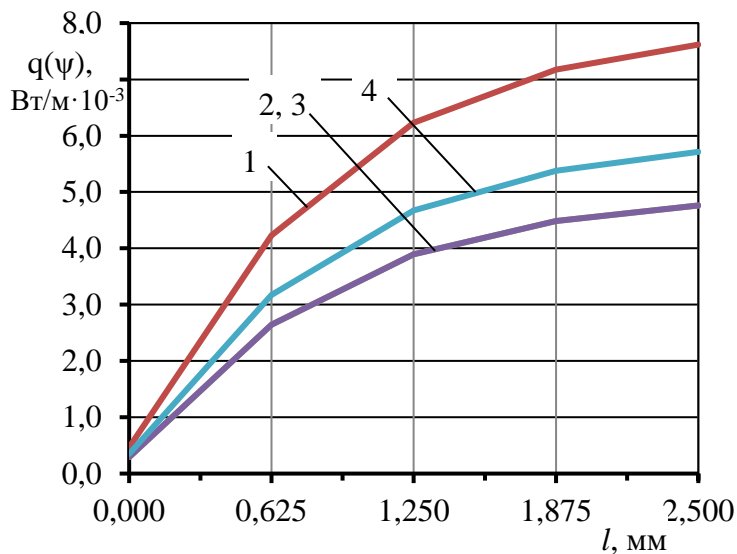


Рис. 1. Распределение интенсивности тепловыделения $q(\psi)$ вдоль главных режущих кромок сверла l от центра сверла к его периферии:

1 – без покрытия; 2, 3 – TiN и TiAlN; 4 – TiAlCrN

вспомогательных режущих кромок и вдоль поперечной кромки (поз. 2 и 3, рис. 2).

Для упрощения расчета, при сохранении достаточной для практики точности, распределение интенсивности теплового потока на задней поверхности не учитывалось.

Результаты расчета распределения температур на контактных площадках и в режущем клине сверла без покрытия и с различными покрытиями представлены на рис. 3 и 4.

Для построения температурных полей в пакете прикладных программ ANSYS была создана трехмерная модель спирального сверла, на контактные площадки которого накладывались интенсивности тепловыделения (рис. 2). Интенсивности тепловыделения накладывали на три контактные площадки спирального сверла – вдоль главных режущих кромок, с учетом выявленного характера их распределения (поз.1, рис. 2), вдоль вспомогательных режущих кромок и вдоль поперечной кромки (поз. 2 и 3, рис. 2).

Представленные на рис. 3 результаты численного моделирования с высокой степенью достоверности отражают физический процесс операции сверления и влияния покрытий на тепловое состояние контактных площадок спирального сверла. Наблюдается рост тепловыделения от центра сверла к его периферии, связанный с увеличением скорости резания и уменьшением тепловыделения по мере отдаления от режущих кромок. Максимальные температуры на контактных площадках сверл с покрытиями и без покрытия имеют место на главных режущих кромках вблизи ленточки. Нанесение ИП снижает данную температуру.

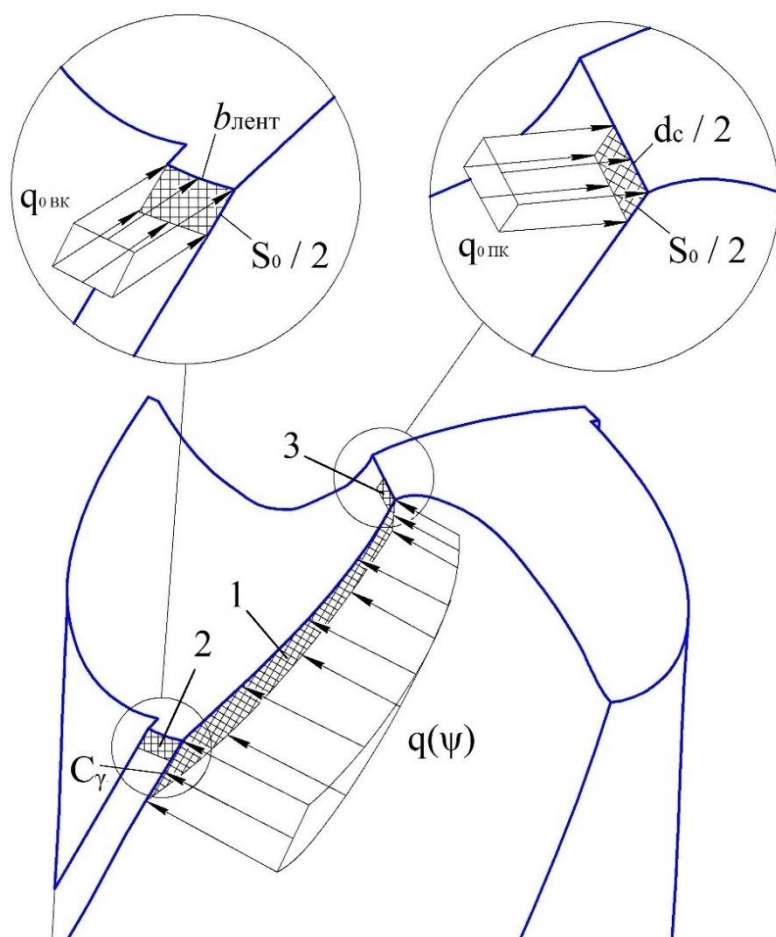


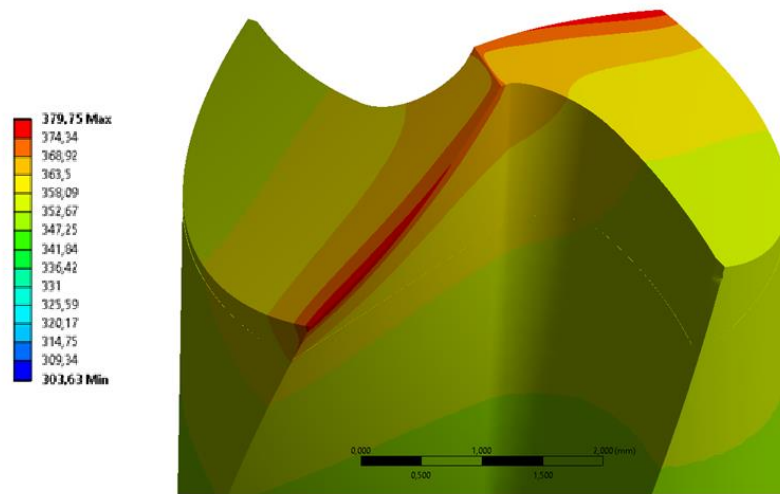
Рис. 2. Схема наложения интенсивностей тепловых потоков на контактные площадки сверла

кромки и ленточки по сравнению со сверлом без покрытия (рис. 3). Наблюдаемое смещение связано с уменьшением длины контакта C_γ при нанесении покрытия. Например, в сечении секущей плоскости, на середине главной режущей кромки это смещение составило в среднем 40%. Нанесение многоэлементных покрытий TiAlN и TiAlCrN из-за увеличения величины C_γ по сравнению с покрытием TiN ведет к смещению изотерм температур в режущем клине, в сторону от режущей кромки и ленточки соответственно на 11 % и 31 %.

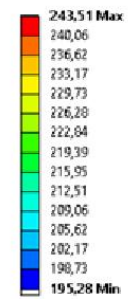
Наибольшее снижение температуры наблюдается при нанесении покрытий TiN и составляет в среднем

36 %. Применение покрытий TiAlN и TiAlCrN так же ведет к снижению максимальной температуры на главных режущих кромках вблизи ленточек по сравнению со сверлом без покрытия на 34 % и 24 % соответственно. Аналогичное уменьшение температур установлено на поперечной кромке и вспомогательных режущих кромках.

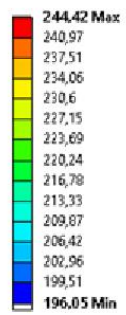
Установлено, что нанесение покрытия TiN смещает изотермы температурных полей в режущем клине спирального сверла в сторону главной режущей



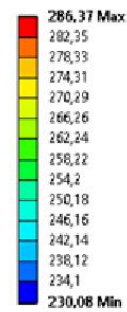
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Распределение температур на контактных площадках сверла, °С:
 а – без покрытия; б – TiN; в – TiAlN; г – TiAlCrN

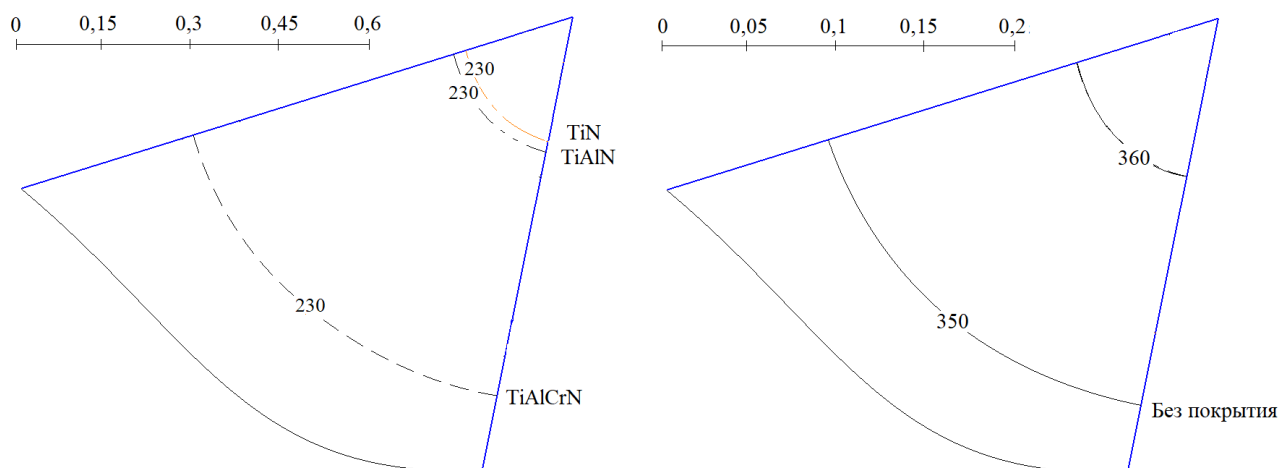


Рис. 4. Распределение температуры в режущем клине сверла в главной секущей плоскости по середине режущей кромки, °С

Аналогичное смещение изотерм температуры происходит и в секущих плоскостях главной режущей кромки на расстоянии 0,1 мм от поперечной и вспомогательной режущей кромок. При этом наблюдаемое смещение изотерм температуры в режущем клине сверла в сторону от режущей кромки возрастает в направлении к вспомогательным режущим крокам.

Результаты численного моделирования показали, что наилучшее тепловое состояние режущего клина спиральных сверл обеспечивает трехэлементное покрытие TiAlCrN. Несмотря на некоторое повышение контактной температуры на передней поверхности по сравнению с покрытиями TiN и TiAlN, нанесение покрытия TiAlCrN в большей степени смещает изотермы температур от главных режущих кромок и ленточки, что ведет к снижению теплонапряженности на данных участках спирального сверла и должно положительно отразиться на его работоспособности.

На основе анализа результатов исследований механических свойств покрытий, функциональных параметров процесса сверления и теплового состояния спиральных сверл с учетом принятого принципа формирования МП, предложены архитектуры двухслойных покрытий TiAlN-TiAlCrN и TiAlN-TiAlZrN.

Проведены исследования фазового состава, структурных параметров и механических свойств двухслойных покрытий TiAlN-TiAlCrN. Установлено, что двухслойные покрытия являются однофазными с фазой нитрида титана с кубической кристаллической решеткой. Фазовый состав двухслойных покрытий не отличается от фазового состава однослойных покрытий – в покрытиях присутствуют фазы нитрида титана TiN и карбида титана WC. Структурные параметры двухслойных покрытий также практически не отличаются от аналогичных параметров однослойных покрытий. Изменение соотношения толщин функциональных слоев двухслойного покрытия (Δ - отношение толщины нижнего слоя к общей толщине двухслойного покрытия) практически не оказывает влияния на структурные параметры и механические свойства (микротвердость H_{μ} , модуль упругости E , коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} , сопротивляемость абразивному изнашиванию H_{μ} / E и пластическому деформированию H_{μ}^3 / E^2)

(табл. 4). В тоже время наблюдается снижение коэффициента отслоения K_0 , что свидетельствует о повышении прочности адгезии двухслойного покрытия.

4. Влияние соотношения толщин слоев двухслойного покрытия на механические свойства

Δ , %	H_μ , ГПа	E, ГПа	H_μ / E	H_μ^3 / E^2 , ГПа	K_{1C} , МПа·м ^{1/2}	K_0
33	37,1±2,7	423,7±29,1	0,087	0,284	4,57	0,23
50	38,1±1,3	419,9±21,5	0,090	0,314	4,48	0,34
66	37,8±2,0	417,9±23,8	0,090	0,309	4,47	0,42

Двухслойные покрытия по сравнению с однослойными покрытиями TiAlN и TiAlCrN имеют более высокую микротвердость (на 23...30 %), модуль упругости (на 5...9,5 %), коэффициент интенсивности напряжений (на 9,3...12,3 %) и прочность адгезии (коэффициент K_0 меньше в 3,9-4,3 раза).

Установлено, что общая толщина двухслойных покрытий не оказывает влияния их структурные параметры и механические свойства.

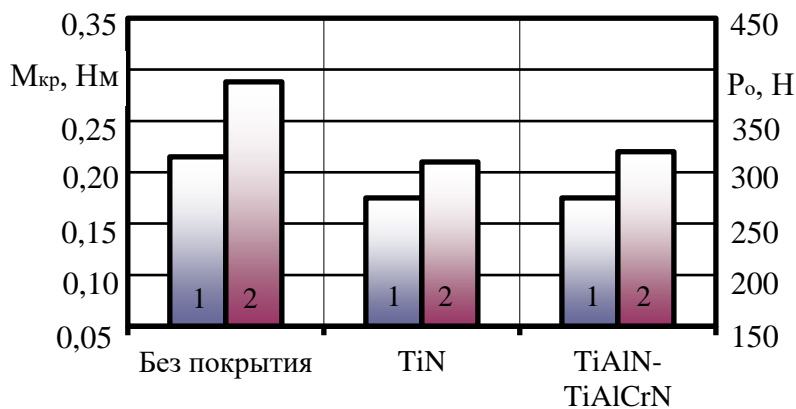
Исследованиями интенсивности изнашивания спиральных сверл с разработанными двухслойными покрытиями установлено, что минимальная интенсивность изнашивания твердосплавных сверл обеспечивается при толщине верхнего функционального слоя 60-70 % от общей толщины двухслойного покрытия.

Разработаны компоновочные схемы установки и технологические параметры нанесения двухслойных покрытий.

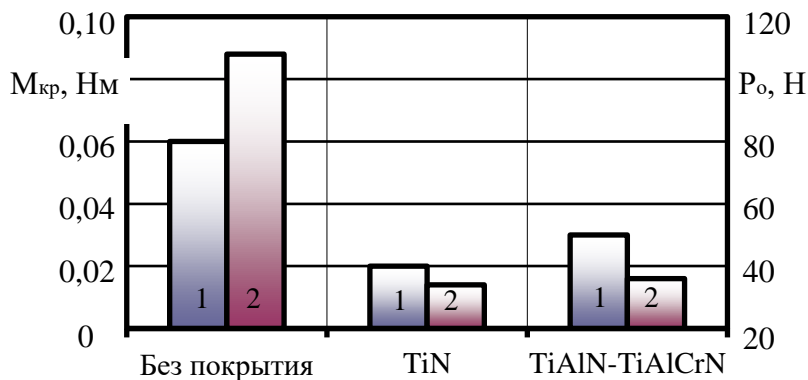
В четвертой главе представлены результаты исследований функциональных параметров процесса сверления, работоспособности спиральных сверл, опытно-промышленных испытаний, а также определена экономическая эффективность применения спиральных сверл с разработанными двухслойными покрытиями.

Установлено (рис. 5), что нанесение двухслойных покрытий TiAlN-TiAlCrN снижает осевую силу и крутящий момент по сравнению со сверлом без покрытия.

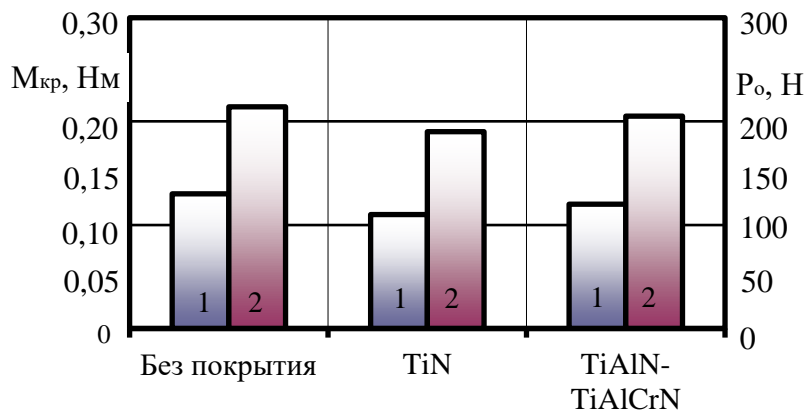
Как и в случае с однослойными покрытиями наибольшее снижение значений данных параметров имеет место на вспомогательных режущих кромках и составило в среднем в 1,8-3,1 раза для осевой силы и 2-2,7 раза для крутящего момента в зависимости от режима резания. На главной режущей кромке и поперечной кромках снижение указанных параметров существенно ниже. Так, на главной режущей кромке оно составило в среднем 16-27 % для осевой силы и 18-25 % для крутящего момента, на поперечной кромке – соответственно 4-7,3 % и 7,7-10 % в зависимости от режима резания.



а)



б)



в)

Рис. 5. Влияние износостойких покрытий на крутящий момент $M_{кр}$ и осевую силу резания P_o , действующих на главной режущей кромке (а), вспомогательной режущей кромке (б) и поперечной кромке (в):

$V = 15$ м/мин и $S_o = 0,1$ мм/об;

1 – $M_{кр}$, Нм; 2 – P_o , Н.

Установлено, что наибольшая доля осевой силы и крутящего момента приходится на главную режущую кромку и составляет 45-46 % для крутящего момента и 47-50 % для осевой силы в зависимости от режима резания.

Вместе с этим, можно отметить, что значительное снижение доли осевой силы и крутящего момента на вспомогательных режущих кромках ведет к небольшому их повышению на главной режущей кромке и поперечной кромке.

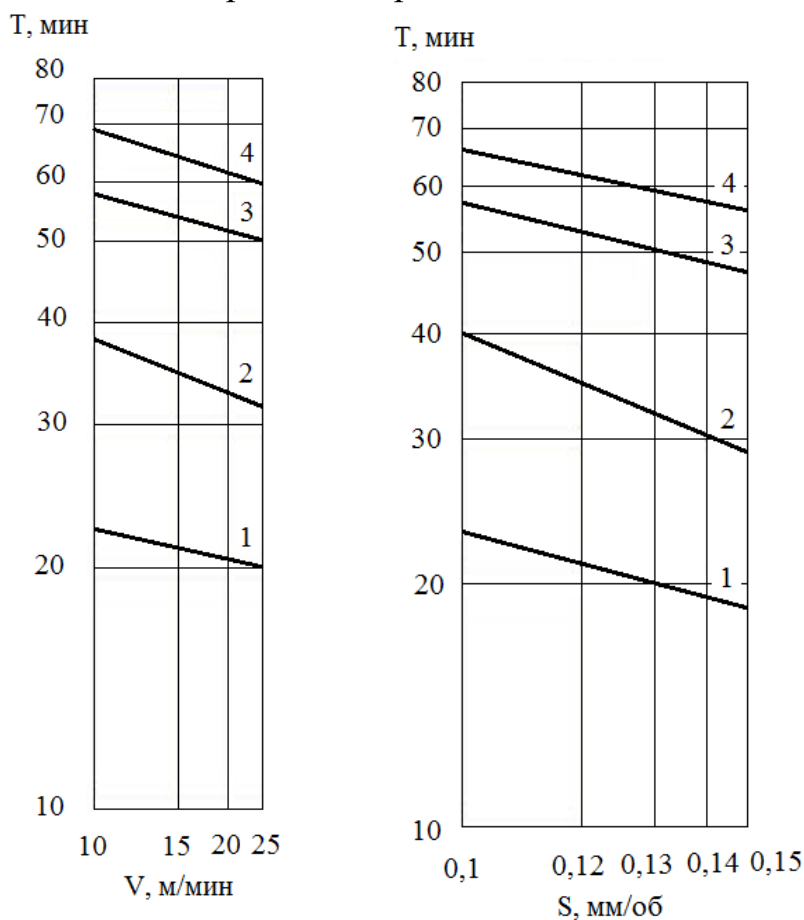
Таким образом, проведенные исследования показали, что нанесение многослойного покрытия TiAlN-TiAlCrN изменяет контактные характеристики процесса сверления заготовок. При этом, наибольшее влияние покрытий проявляется на вспомогательных режущих кромках.

Для оценки эффективности двухслойного покрытия TiAlN-TiAlCrN провели стойкостные испытания сверл при сверлении заготовок из нормализованной стали 30ХГСА.

Результаты данных исследований представлены на рис. 6.

Как видно из полученных данных, применение двухслойных покрытий повышает период стойкости сверл в 2,5-3,1 раза по отношению к сверлам без

покрытия и в 1,7-1,8 раза – по отношению к сверлам с покрытием TiN в зависимости от режима обработки.



а) б)
Рис. 6. Влияние скорости (V) резания (а) и подачи (S) на оборот (б) на период стойкости (T) сверл: 1 – без покрытия, 2 – TiN, 3 – TiAlN-TiAlCrN; 4 – TiAlN-TiAlZrN
а – S = 0,12 мм/об, б – V = 20 м/мин

На основании экспериментальных данных получены математические модели периода стойкости спиральных сверл (табл. 6).

Опытно-промышленные испытания, проведенные в производственных условиях завода АО «Ульяновский механический завод» (г. Ульяновск), подтвердили высокую эффективность разработанных двухслойных покрытий. Коэффициент повышения периода стойкости спиральных сверл с многослойными покрытиями составил 1,25 по сравнению со сверлами с однослойными покрытиями TiAlCrN и 2,36 по сравнению со сверлами

без покрытия.

6. Математические модели периода стойкости спиральных сверл

Покрытие	Обрабатываемый материал
	30ХГСА
Без покрытия	$T = 10,028 \cdot V^{-0,127} \cdot S^{-0,522}$
TiAlN-TiAlCrN	$T = 26,54 \cdot V^{-0,115} \cdot S^{-0,488}$
TiAlN-TiAlZrN	$T = 31,02 \cdot V^{-0,110} \cdot S^{-0,481}$

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований получены следующие научные выводы и практические результаты:

1. Установлены закономерности влияния ИП на осевую силу и крутящий момент, действующих на главных, вспомогательных режущих кромках и поперечной кромке спирального сверла. Показано, что наибольшее снижение осевой силы и крутящего момента происходит на вспомогательных режущих кромках.

2. Выявлены доли осевой силы и крутящего момента, приходящиеся на рабочие элементы спиральных сверл без покрытия и с различными ИП, тенденция небольшого роста осевой силы и крутящего момента при переходе от одноэлементных ИП к многоэлементным.

3. Разработана методика расчета тепловых полей в режущих клиньях спирального сверла покрытиями, учитывающая долю силовых нагрузок, приходящихся на различные кромки сверла, на основе которой проведено численное моделирование теплового состояния рабочих элементов спирального сверла в среде ANSYS. Установлено, что применение ИП значительно снижает температуру на контактных площадках спирального сверла, а применение многоэлементных ИП приводит к смещению изотерм температуры в сторону от главных режущих кромок, тем самым улучшая тепловое состояние режущего клина .

4. Предложен принцип формирования МП спиральных сверл и обоснованы составы его функциональных слоев. Выявлены закономерности влияния конструкции МП на их структурные параметры, механические свойства и интенсивность изнашивания спиральных сверл. Установлено, что двухслойные покрытия по сравнению с однослойными покрытиями TiAlN и TiAlCrN имеют более высокую микротвердость на 23...30 %, модуль упругости (на 5...9,5 %), коэффициент интенсивности напряжений (на 12,3 %) и прочность адгезии (коэффициент K_0 меньше в 3,9-4,3 раза). Показано, что соотношение толщин функциональных слоев оказывает влияние на прочность адгезии и практически не влияет, как и общая толщина, на механические свойства двухслойных покрытий. Установлено, что минимальная интенсивность изнашивания твердосплавных сверл обеспечивается при толщине верхнего функционального слоя составляющей 60-70 % от общей толщины двухслойного покрытия.

5. Установлено, что применение двухслойных покрытий повышает период стойкости сверл в 2,5-3,1 раза по отношению к сверлам без покрытия и в 1,7-1,8 раза – по отношению к сверлам с покрытием TiN в зависимости от режима обработки. Эффективность разработанных МП подтверждена опытно-промышленными испытаниями в условиях АО «Ульяновский механический завод». Коэффициент повышения периода стойкости спиральных сверл с МП составил 1,25 по сравнению со сверлами с однослойными ИП TiAlCrN и 2,36 по сравнению со сверлами без покрытия.

6. Техничко-экономическими расчетами показано, что применение спиральных сверл с разработанными МП позволяет снизить себестоимость операции сверления за счет уменьшения расходов на инструмент. Ожидаемый годовой

экономический эффект от внедрения данных покрытий на одной операции сверления составил 34 355 рублей на один станок.

Основные положения диссертации отражены в нижеследующих публикациях:

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Табаков В.П., Сагитов Д.И., Аль-Кадхими М.Ф.Д. Повышение эффективности спиральных сверл путем применения многослойных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – № 5. – С. 225-228.
2. Табаков В.П., Сагитов Д.И., Аль-Кадхими М.Ф.Д. Исследование влияния износостойких покрытий на тепловое состояние спиральных сверл // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – № 10. – С. 440-443.

Публикации в журналах, цитируемых в Scopus

3. Al-Kadhimi M.F.D., Sagitov D.I., Chikhranov A.V., Dolzhenko Y.A. Application of Multilayer Coatings based on Complex Titanium Nitrides to improve the efficiency of Twist Drills // Russian engineering research. – 2021. - Т.37. - №12. – 1048-1051.

Публикации в других изданиях:

4. Сизов С.В., Аль Кадхими М.Д. Исследование работоспособности режущего инструмента с многослойными покрытиями // Вузовская наука в современных условиях: сб. материалов 51-й НТК. / С.В. Сизов, М.Д. Аль Кадхими. В 3 ч. Ч.1. - Ульяновск: УлГТУ, 2017. - С.121-124
5. Аль Кадхими М.Д. Применение износостойких покрытий на операциях сверления // Вузовская наука в современных условиях: сб. материалов 51-й НТК. / М.Д. Аль Кадхими. В 3 ч. Ч.1. - Ульяновск: УлГТУ, 2017. - С.118-121.
6. Аль-Кадхими М.Ф.Д. Функциональные параметры процесса резания при сверлении // Высшая школа. – 2020.- №11. – С.36-37.
7. Аль-Кадхими М.Ф.Д. Методика выбора оптимального износостойкого покрытия для сверления // Проблемы и перспективы студенческой науки. – 2020. – № 1(7). – С. 29-30.

Автореферат

Аль-Кадхими Мохаммед Файядх Джассам

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ
ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ**

Подписано в печать 2021. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 Экз. Заказ .

Типография УЛГТУ. 432027, Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.