

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ДЛЯ НОРМИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

*Г.И. СМАГИН, канд. техн. наук, доцент
В.С. КАРМАНОВ, канд. техн. наук
И.В. ФЕДИН, магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 2 июля 2015

Рецензирование 3 августа 2015

Принята к печати 20 октября 2015

Смагин Г.И. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: g.smagin@ngs.ru

Предлагается методика нормирования режимов резания труднообрабатываемых материалов на примере операции сверления. Методика основана на применении новых моделей стойкости инструмента, хорошо согласующихся с результатами экспериментов, а также на построении характеристических линий и поверхностей для параметров процесса резания. Применение предложенной методики позволяет использовать закономерности экспериментальных стойкостей инструментов для различных участков факторного пространства режимов резания, что позволяет снизить количество трудоемких стойкостных экспериментов, повысить точность расчетов оптимальных режимов обработки и графическую наглядность принимаемых решений. В базовые факторы, влияющие на процесс резания, входят геометрические параметры инструмента, применяемый критерий стойкости инструмента, тип смазывающе-охлаждающей жидкости, способ крепления сверла, вылет сверла, глухое или сквозное отверстие, марка обрабатываемого материала, материал сверла, тип сверла и т.п. Методика позволяет рассчитывать как локальные оптимальные режимы резания по критерию минимума затрат, так и табличные режимы вдоль характеристической линии максимальных стойкостей для текущих значений минутных подач без учета затрат при обработке.

На основе предлагаемой методики разработан алгоритм планирования эксперимента для оценивания параметров выбранной стойкостной модели.

Для расчета оптимальных режимов сверления по критерию минимума затрат для широкого диапазона диаметров сверл (от 3 до 40 мм) и обрабатываемых материалов (с коэффициентом обрабатываемости материала от 0,2 до 1) разработан программный комплекс на основе предложенной методики.

Ключевые слова: сверление, режимы сверления, стойкость режущего инструмента, методика нормирования, характеристические линии, характеристические поверхности, планирование эксперимента, обрабатываемость материалов, поправочные коэффициенты, оптимизация, затраты.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-6-17

Введение

В традиционных методиках [1, 2] при нормировании, т. е. определении режимов резания, используются базовые стойкости инструментов. Для конкретного диаметра сверла рассматривается зависимость стойкости от двух факторов – скорости резания v , [м/с] (или частоты вращения n , [об/мин]) и подачи на оборот S_0 , [мм/об].

В современных стандартах используются степенные зависимости стойкости инструмента от режимов обработки [2, 3], хотя имеются исследования различных авторов [4–19], в которых предлагаются другие модели стойкости. В реальных экспериментах на всем поле факторного пространства поверхности отклика стойкости инструмента имеют выпуклый, холмообразный (одноэкстремальный) вид, тогда как степен-

ные зависимости дают вогнутые поверхности отклика, и расчет оптимального режима резания в этом случае становится неопределенной задачей из-за отсутствия экстремума стойкостной функции [20, 21]. Кроме того, расположение линий равного уровня минутных подач $S_M = S_0 n$ [мм/мин] на поле факторного пространства в традиционном нормировании обычно эквидистантно линиям равного уровня стойкостей, что также приводит к неопределенности при решении поставленной задачи. Поэтому за режим обработки на практике принимается режим на технологических ограничениях (режимы предельной прочности инструмента, предельные подачи инструмента по критерию максимальной шероховатости обрабатываемой поверхности и т. п.), что является малоэффективным решением для других условий обработки или режимов минимума затрат.

Алгоритм формирования банка данных рекомендуемых режимов резания в традиционном нормировании на первом этапе заключается в обработке результатов стойкостных экспериментов при определенных фиксированных условиях резания (материал сверла, вылет сверла, геометрия заточки, использование СОЖ, тип сверла) для обрабатываемого материала, который принимается за базис. При сравнении с другими материалами используется коэффициент обрабатываемости $K_{обр}$, за начальную базу принимаются условия [2], при которых принимают равным $K_{обр} = 1$ (за основу берется стойкость инструмента).

Целью данной статьи является описание новой методики нормирования режимов резания, ее базы, а также рекомендации по ее использованию, включая оптимизацию режимов по критерию минимума затрат, применения поправочных коэффициентов для условий обработки деталей, отличных от базовых условий.

Методика исследования процесса резания с использованием стойкостных экспериментов

В традиционной методике режимы резания определяются вдоль стойкостных линий равного уровня на поле двухфакторного пространства, определяемых степенными зависимостями в действующих стандартах. В предлагаемой

методике – вдоль характеристических линий и поверхностей, выявляемых при обработке стойкостных экспериментов (с учетом применения новых математических экспоненциальных моделей стойкости инструмента). При этом устраняется эффект неопределенности при назначении режима резания, характерный для традиционного нормирования. В этой методике используются стойкостные модели, хорошо согласующиеся с данными экспериментов, что, в свою очередь, позволяет снизить ошибки нормирования и шире использовать экстраполяционные возможности применяемых характеристических поверхностей. Кроме того, предлагаемая методика приводит к снижению общего количества трудоемких стойкостных экспериментов при оценивании параметров моделей и дает возможность при нормировании режимов обработки получать реально значимый экономический эффект.

В систему базовых моделей процесса резания включаются: стойкость инструмента L , [мм] – общая длина просверленных отверстий до момента затупления сверла; осевая сила $P_{ос}$, [Н]; крутящий момент $M_{кр}$, [Н×мм]; температура резания t , [°C]. Так же как и в традиционных методиках нормирования, основная роль отводится стойкости инструмента. От выбора модели стойкости во многом зависит качество и точность нормирования режимов резания.

В предыдущих работах авторов [20–22] в качестве базовой предлагается использовать экспоненциальную модель стойкости

$$L = A \exp \left\{ - \left(\frac{n - a_n}{b_n} \right)^2 - \left(\frac{S_0 - a_s}{b_s} \right)^2 \right\}. \quad (1)$$

Параметры модели имеют простой физический смысл: A – характеризует максимальное значение стойкости на поле факторного пространства; a_s, a_n – характеризуют координаты этого максимума стойкости; b_n, b_s – характеризуют полуоси эллипса стойкости на заданном уровне $A/2,73$ в координатах n, S_0 .

Оптимизация технологических условий обработки деталей включает в себя решение различных технологических, экономических, конструкторских и организационных задач. В качестве критериев оптимизации обычно принимают:

- критерий максимума стойкости режущего инструмента;

• критерий минимальной технологической себестоимости выполнения операции [23–25], например:

$$C_u = C_0 t_m + (t_m / T) \times \\ \times (C_0 t_{cs} + C_t) + C_0 (t_h + t_R) + C_m, \quad (2)$$

где C_u – производственная стоимость одной детали, [у.е.]; C_0 – операционная стоимость, [у.е./мин]; C_m – стоимость материала, [у.е./ед]; t_m – машинное время, [мин]; T – стойкость инструмента, [мин]; t_{cs} – время замены инструмента, [мин]; C_t – стоимость инструмента, [у.е.]; t_h – время загрузки и выгрузки, [мин]; t_R – быстрое время возврата, [мин];

• критерий максимальной производительности, обеспечивающий наименьшие затраты времени на обработку [23, 26], например:

$$P_t = t_m + (t_c) \frac{t_m}{T} + t_h, \quad (3)$$

где P_t – производственное время обработки одной детали, [мин]; t_m – время обработки заготовки, [мин]; $(t_c) \frac{t_m}{T}$ – время замены инструмента на одну деталь, [мин]; t_c – время однократной замены инструмента, [мин]; T – стойкость (время жизни) инструмента, [мин]; t_h – время закрепления инструмента, [мин].

При нахождении оптимальных режимов резания в качестве критерия оптимальности использовался критерий минимума затрат [27]:

$$Q(n, S_0) = \frac{C}{L(n, S_0)} + \frac{D}{S_0 n} + E, \quad (4)$$

где C , D , E – некоторые экономические параметры. К таким критериям можно отнести критерий минимума затрат, минимума себестоимости (единичного изделия, производственной линии, цеховой, заводской, отраслевой, что определяется экономическими параметрами C , D , E).

В работе [20] показано, что для некоторого класса моделей стойкости (выпуклые унимодальные) оптимальные режимы по критерию (4) лежат на линии, определяемой характеристическим уравнением

$$\frac{\partial L}{\partial n} n = \frac{\partial L}{\partial S_0} S_0. \quad (5)$$

К моделям такого класса относятся модели типа (1) и другие.

Характеристическая линия, определяемая уравнением (5), была названа кривой IIS_M и является линией, на которой расположены режимы максимальных стойкостей для текущих значений минутных подач [20, 21].

Для модели (1) характеристическая линия $<< IIS_M$ имеет вид (рис. 1)

$$IIS_M : S_0(n) = \frac{a_s}{2} + \\ + \frac{1}{2b_n} \sqrt{b_n^2 a_s^2 - 4a_n b_s^2 n + 4b_s^2 n^2}. \quad (6)$$

На рис. 1 на поле двухфакторного пространства приведены линии равного уровня трех поверхностей – стойкость инструмента, минутные подачи и уровень затрат.

Эксперимент проводился при сверлении стали 1Х18Н9Т быстрорежущим сверлом из Р6М5 диаметром 4,2 мм, глубиной отверстия $2d$, вылетом сверла $10d$, отверстия глухие, с применением СОЖ НГЛ205, расходом 1 л/мин, критерий затупления – до поломки сверла или до характерного скрежета. Расчет затрат при обработке по уравнению (4) позволяет определять координаты режима минимума затрат, т. е. оптимальный режим. Этот режим (1660 об/мин; 0,065 мм/об) был получен при следующих параметрах: зарплата сверловщика – 20 тыс. руб/мес., зарплата заточника – 20 тыс. руб/мес., время на заточку инструмента – 5 мин, количество переточек до полного износа инструмента – 5, суммарная длина отверстий в изделии 16 760 мм, время на смену инструмента – 3 мин, покупная стоимость инструмента – 50 руб/шт.

В качестве третьего фактора, существенно влияющего на стойкость, был выбран диаметр сверла. Для различных диаметров сверл были построены регрессионные модели зависимостей параметров моделей (1) от диаметра. В результате эксперимента было установлено, что эти зависимости с приемлемой для практики точностью можно аппроксимировать логарифмически линейными моделями [22]

$$A = \alpha_A d^{\beta_A}, a_n = \alpha_{an} d^{\beta_{an}}, a_s = \alpha_{as} d^{\beta_{as}}, \\ b_n = \alpha_{bn} d^{\beta_{bn}}, b_s = \alpha_{bs} d^{\beta_{bs}}, \quad (7)$$

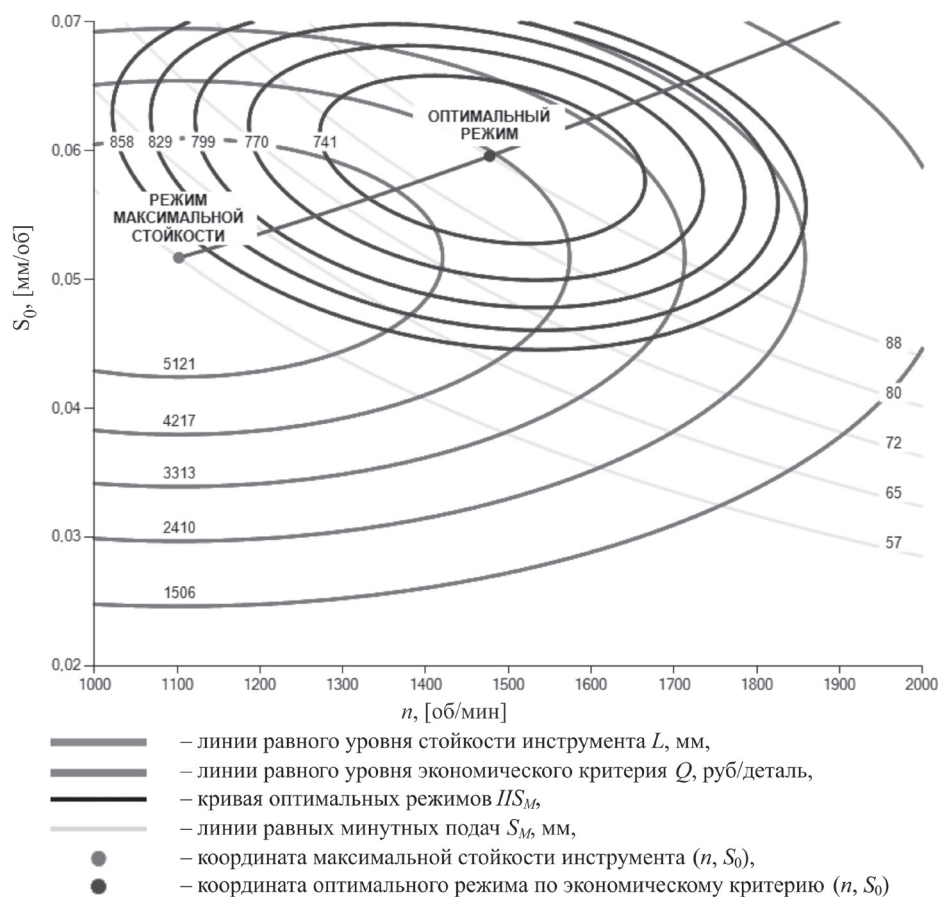


Рис. 1. Картина стойкости экспоненциальной модели и минутных подач. Коэффициент обрабатываемости материала $K_{обр} = 1$ (сталь 1Х18Н9Т), диаметр сверла $d = 4,2$ мм

и, таким образом, перейти к трехфакторной модели

$$L(n, S_0, d) = \alpha_A d^{\beta_A} \exp \times \left(- \left(\frac{n - \alpha_{an} d^{\beta_{an}}}{\alpha_{bn} d^{\beta_{bn}}} \right)^2 - \left(\frac{S_0 - \alpha_{as} d^{\beta_{as}}}{\alpha_{bs} d^{\beta_{bs}}} \right)^2 \right), \quad (8)$$

где α_A , α_{an} , α_{as} , α_{bn} , α_{bs} , β_A , β_{an} , β_{as} , β_{bn} , β_{bs} – параметры трехфакторной модели.

Другой характеристической линией является линия максимальных стойкостей для различных диаметров сверл для обрабатываемых материалов фиксированного коэффициента обрабатываемости, которую обозначим $L1$. Ее уравнение выглядит следующим образом:

$$L1: S_0(n) = \alpha_{as} \left(\frac{n}{\alpha_{an}} \right)^{\beta_{as}}. \quad (9)$$

При нормировании режимов резания для материалов различной обрабатываемости необходимо строить регрессионные зависимо-

сти параметров трехфакторной модели (8) от $k = K_{обр}$. Опыты показывают, что показатели степени β_i изменяются незначимо, а для параметров α_i достаточно применения линейной регрессии $\alpha_i = k \tilde{\alpha}_i$, где $\tilde{\alpha}_i$ – скорректированный по результатам эксперимента коэффициент. При введении в модель нового фактора k можно перейти от характеристических линий IIS_M и $L1$ к характеристическим поверхностям $IIS_M - IIS_M$ и $L1 - L1$. Особо важное значение для нормирования режимов имеет поверхность $IIS_M - IIS_M$.

Уравнение поверхности $IIS_M - IIS_M$ имеет вид

$$IIS_M - IIS_M : S_0(n, d) = \frac{a_{sd} b_{nd} + \sqrt{(a_{sd} b_{nd})^2 - 4 b_{sd}^2 a_{nd} n + 4 b_{sd}^2 n^2}}{2 b_{nd}}, \quad (10)$$

где $a_{sd} = \alpha_{as} d^{\beta_{as}}$, $a_{nd} = \alpha_{an} d^{\beta_{an}}$; $b_{nd} = \alpha_{bn} d^{\beta_{bn}}$; $b_{sd} = \alpha_{bs} d^{\beta_{bs}}$, а уравнение поверхности $L1 - L1$ имеет вид

$$L1 - L1 : \begin{cases} n = k \tilde{\alpha}_{an} d^{\beta_{an}}, \\ S_0 = k \tilde{\alpha}_{as} d^{\beta_{as}}. \end{cases} \quad (11)$$

Применение двух характеристических линий IIS_M и $L1$ и двух характеристических поверхностей $IIS_M - IIS_M$ и $L1 - L1$ позволяет завершить математическое описание «базы» нормирования режимов резания для широкого спектра материалов по их обрабатываемости и диаметров сверл.

Новым в предлагаемом нормировании режимов сверления является также применение плавающего индекса обрабатываемости материалов при изменении условия обработки.

Изменение условий обработки при определении режимов резания можно (как и в традиционном нормировании) учитывать с помощью существующего банка данных поправочных коэффициентов, хотя на сегодняшний день корректность их определения вызывает много вопросов. Это связано с тем, что эти коэффициенты определяются формально по условию сравнительных значений стойкостей при одинаковых режимах обработки, что не всегда хорошо соответствует экспериментальным данным. Следует отметить, что теории поправочных коэффициентов в резании металлов уделялось недостаточно внимания. Как показали стойкостные эксперименты, определение поправочных коэффициентов при обработке разных материалов необходимо делать не при одинаковых режимах резания, а на режимах одинаковых физических воздействий на инструмент для базового случая и для новых условий обработки. Опыты необходимо проводить на режимах одинаковых температурных и силовых воздействий на инструмент или на режимах максимальных стойкостей при обработке каждого материала, т. е. для разных материалов и одного и того же диаметра сверла будем иметь разные режимы обработки.

Базовые модели используются как для нормирования режимов обработки (табличное задание), так и для их оптимизации. Другая важная функция базовой модели – применение ее как условного эталона характеристик инструмента для сравнения их при исследованиях возможных улучшений различных параметров инструментов. Так-

же базовые модели используются при проектировании станков с системами управления со стабилизацией $M_{кр}$, $P_{ос}$ или $t^{\circ}C$ на инструменте и других способах обработки, где необходимы сравнительные стойкостные показатели. Исследования эффективности обработки с выбором различных СОТС (смазочно-охлаждающих технологических составов) также предполагают использование стойкостных моделей.

После определения коэффициентов моделей стойкости для базовых условий обработки и определения всех ее коэффициентов для сталей с обрабатываемостью от 0,2 до 1 также для базовых условий все остальные разнообразные условия обработки (режимы резания) обычно корректируются через поправочные коэффициенты. Например, поверхность обрабатываемого материала может быть после прокатки или с литевой коркой, сверление сквозное или глухое и т. п.

Существующий способ учета всех иных условий обработки связан обычно с коррекцией конкретного базового режима. Применение поправочных коэффициентов, позволяющих уточнить режимы обработки, уменьшает количество трудоемких стойкостных экспериментов.

На рис. 2 представлена характеристическая поверхность ($IIS_M - IIS_M$) режимов для материалов с различной обрабатываемостью.

Для разных материалов, обрабатываемость которых находится в диапазоне от 0,2 до 1, имеет место совокупность таких поверхностей, которая представляет всю область возможных ре-

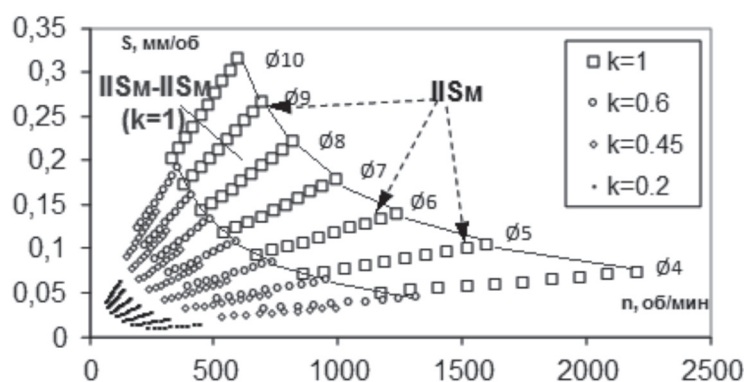


Рис. 2. Характеристические поверхности $IIS_M - IIS_M$ режимов обработки для труднообрабатываемых материалов, $K_{обp} = 1; 0,6; 0,45; 0,2$, сверла нормального исполнения $d = 4 \dots 10$ мм. Кривая IIS_M – характеристическая линия локальных максимумов стойкостей для текущих значений S_M

жимов резания, т. е. область нормирования (см. рис. 2). Возвращаясь к способу учета всех иных условий обработки для предложенной методологии нормирования, введем понятие плавающего индекса обрабатываемости.

Любое отклонение условий обработки от базовых характеристик приводит к сдвигу обрабатываемости (поверхность $IIS_M - IIS_M$. Коэффициент сдвига находится из ряда рекомендуемых существующих в настоящее время поправочных коэффициентов. Эти поправочные коэффициенты более корректно можно назвать коэффициентами сдвига поверхностей обрабатываемости (рис. 2). Отсюда и введение понятия плавающего коэффициента обрабатываемости.

Достоинствами этого приема являются простые программные вычисления режимов обработки, графическая наглядность метода, что должно упростить понимание технологами всех процедур определения оптимальных режимов обработки.

На рис. 3 показана новая характеристическая линия обрабатываемости $L1$, определенная для материала с обрабатываемостью $K = 0,8$. После этого определяется координата режима максимальной стойкости для нужного диаметра сверла и при необходимости линия IIS_M .

Компоненты вектора сдвига определялись через поправочные коэффициенты (K_V, K_S). Так как они исходили из точки пересечения линий IIS_M для искомого диаметра сверла и линии $L1$ (линии максимальных стойкостей сверл разных диаметров), то конец вектора сдвига по-

верхности обрабатываемости должен пересечь линию $L1$ нового значения обрабатываемости (см. рис. 3). Отсюда в методику и вводится понятие плавающего индекса обрабатываемости. При этом новая линия $L1^*$ имеет пересечение с линией IIS_M для того же рассматриваемого диаметра, где и определяется координата оптимального режима обработки. Достаточно полно поправочные коэффициенты представлены в [20, 21].

Итак, в предлагаемой методике при обработке результатов стойкостных экспериментов определяются параметры модели с $K_{обр} = 1$. Далее на втором этапе экспериментов по этой же методике для конкретных условий обработки определяются параметры стойкостных моделей, но для материалов с обрабатываемостью меньше единицы ($K_{обр} = 0,8; 0,6; 0,4; 0,2$). Все это и составляет базу методики нормирования. Затем в банк данных вводятся поправочные коэффициенты, которые при изменении условий обработки могут быть использованы в последующих расчетах.

Оценивание базовых параметров моделей процесса резания происходит обычно в несколько этапов и является трудоемкой операцией. Поэтому необходимо привлекать аппарат теории планирования экспериментов для повышения информативности определяемых параметров моделей.

На первом этапе исследований для получения базовой информации оцениваются параметры двухфакторной модели (1) по полным факторным (5^2 и 3^2) или специальным планам. На втором этапе экспериментальных исследований (через испытания различных диаметров сверл) определялись параметры трехфакторной модели. На третьем этапе для материалов с различной обрабатываемостью проводились эксперименты вдоль линий S_M и IIS_M по специальным двухуровневым планам для уточнения параметров модели (8). По этим планам стойкостных экспериментов на первом уровне испытаний определяются координаты режимов максимальных стойкостей для выбранных двух значений минутных подач. После этого через эти координаты режимов обработки графически проводится линия IIS_M , на которой ставятся (2-й уровень

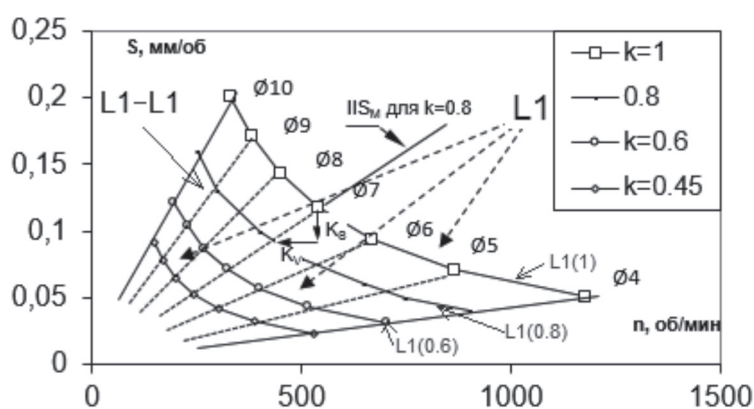


Рис. 3. Характеристическая поверхность $L1-L1$. $L1$ — характеристическая линия максимальных значений стойкостей для текущих диаметров сверл для сталей различной обрабатываемости, определение характеристической линии $L1(0,8)$ вычисляется через поправочные коэффициенты

опытов) дополнительные эксперименты, чтобы определить параметры уравнения IIS_M .

Все экспериментальные значения стойкости первого и второго уровней используются для расчета параметров стойкостной модели (1), а при использовании результатов нескольких планов эксперимента для различных диаметров сверл – расчета параметров стойкостных моделей (8).

Предлагаемая методика рассматривается на примере операции сверления, с небольшими изменениями она может быть применена для других процессов обработки материалов и других видов обработки при безнарывном стружкообразовании (точение, фрезерование и др.).

Результаты экспериментов по определению базовых стойкостных моделей

Параметры уравнения модели (8) были рассчитаны по экспериментальным данным [18] (для материалов с $K_{обр} = 1$, инструмент из быстрорежущей стали P6M5):

$$L(S_0, n, d) = 4112d^{0,43} \exp \times$$

$$\times \left[- \left(\frac{S_0 - 0,0052d^{1,59}}{0,0017d^{1,81}} \right)^2 - \left(\frac{n - 7758d^{-1,36}}{6049d^{-1,4}} \right)^2 \right];$$

$$P_{oc} = -404,42 - 0,044n +$$

$$+ 9529S_0 + 85,84d;$$

$$M_{кр} = -519 + 1,53n + 44079S_0 -$$

$$- 983d + 96245S_0^2 + 129d^2 - 24S_0n; \quad (12)$$

$$t \text{ } ^\circ\text{C} = -33,6 + 39,7d + 0,33n -$$

$$470,3S_0 - 0,82d^2 - 9 \cdot 10^{-5}n^2 +$$

$$+ 850S_0^2 + 0,98S_0n.$$

Для измерения температуры использовался метод естественной (искусственной) термопары и метод оплавления тонких пленок металла, нанесенных на заднюю поверхность инструмента. По предлагаемому алгоритму нормирования были рассчитаны режимы резания для различных групп обрабатываемости сталей. Результаты расчетов сводятся в табличные режимы.

Итак, при нормировании режимов резания выявляются закономерности изменения стойкости инструментов для определения условий обработки, которые можно описать характеристическими поверхностями $IIS_M - IIS_M$ и $L1 - L1$. Поверхности $IIS_M - IIS_M$ для материалов разной обрабатываемости используются для расчета табличных режимов резания или непосредственных расчетов режимов резания конкретного материала и конкретного используемого инструмента (например, режимы для специального станка). При этом в табличных режимах даются координаты режимов обработки от режимов максимума стойкости до режимов максимума производительности на малой стойкости (режимы вдоль характеристических линий IIS_M), чего нет в традиционном нормировании – там обычно дается рекомендация для одного режима. Применение характеристической поверхности $IIS_M - IIS_M$ позволяет использовать экстраполяционные процедуры для расчета режимов обработки сверлами большого диаметра (диаметром от 10 до 60 мм), для которых проведение стойкостных экспериментов проблематично, что также неосуществимо при традиционном нормировании.

Характеристическая поверхность $L1 - L1$ удобна при использовании коррекции режимов резания как раз при экстраполяционных процедурах, где необходимо страховать от возможных расчетных ошибок при определении режимов резания. Для этого используются следующие физические закономерности, установленные эмпирически при изнашивании инструмента: для любого диаметра сверла пересечение линий IIS_M с соответствующей ей линией $L1$ характеризуется температурой $\approx 300 \text{ } ^\circ\text{C}$ [21] и определенным удельным давлением на задней поверхности инструмента. Эти эмпирические закономерности позволяют проверять вычислительные эксперименты и строить экстраполяцию вне экспериментальной области.

Программный комплекс

По предложенной методике нормирования на примере операции сверления разработан программный комплекс проектирования режимов резания. Для корректной работы этого Windows-приложения требуется установка приложения

Microsoft .NET Framework v4.0.30319. Работоспособность комплекса проверена в операционных системах Windows 7, Windows 8 и Windows 8.1. Предусмотрена защита от ввода некорректных данных.

Программа имеет интуитивно понятный интерфейс с наглядной визуализацией. Окно интерфейса разделено на две части. Левое – поле ввода параметров, которое разделено на тематические блоки: «Отображаемые линии», «Дополнитель-

ные факторы модели», «Параметры критерия». Правую часть окна занимает поле графической интерпретации и результатов оптимизации, где расположены вкладки, каждая из которых соответствует различным факторам режимов резания: частота вращения [об/мин], подача на оборот [мм/об], скорость вращения [м/мин], минутная подача [мм/мин]. В программе предусмотрена визуализация стойкостной модели в пространстве перечисленных факторов (рис. 4).

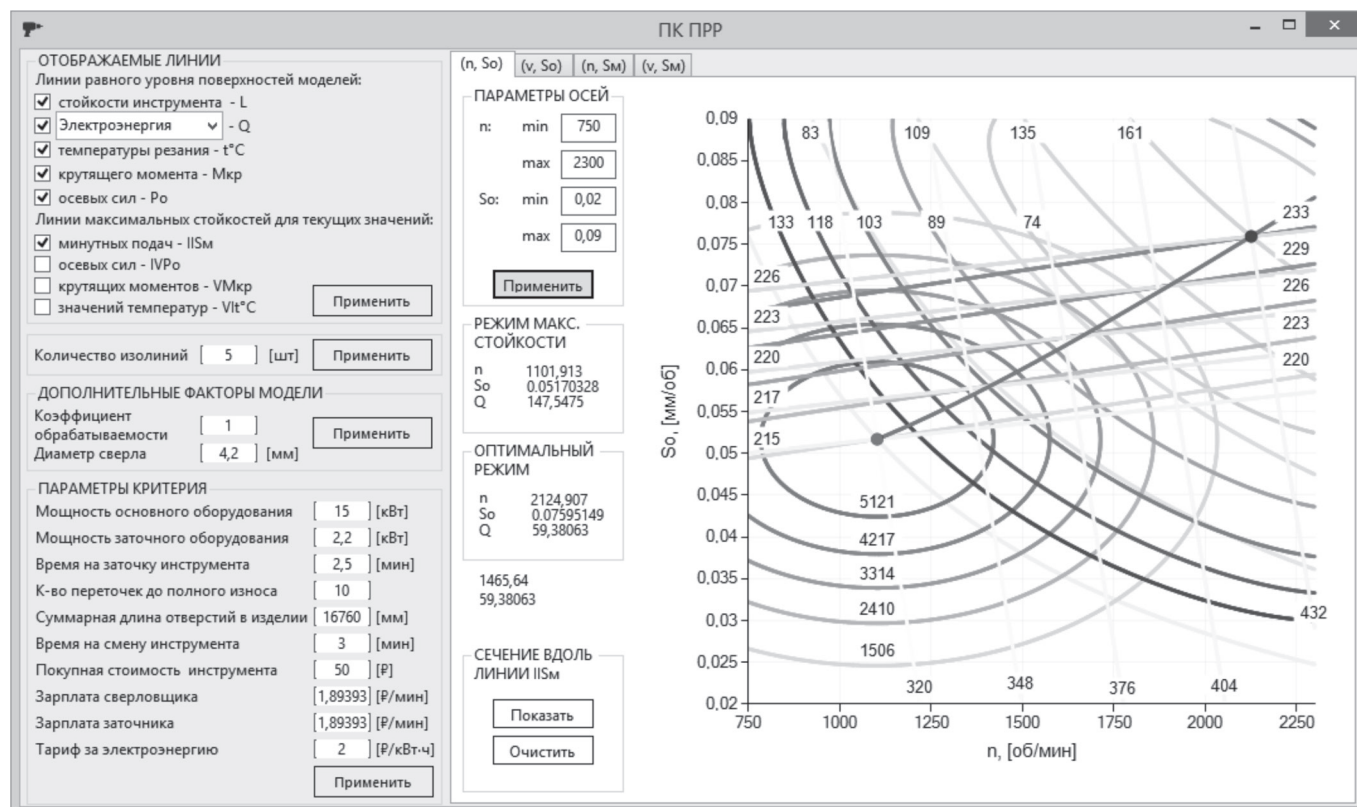


Рис. 4. Интерфейс программного комплекса

Выводы

На основе базовых стойкостных экспериментов и определения стойкостных закономерностей, включая также математическое описание процесса стойкости при сверлении труднообрабатываемых материалов, для разработки программного комплекса расчета режимов сверления была получена информация:

1) общего нормирования режимов сверления, а также возможности оптимизации частных режимов резания по критерию минимума затрат;

2) возможности расчета табличных режимов сверления для различных диаметров сверл

для различных по обрабатываемости материалов;

3) корректировки режимов резания для иных условий обработки по сравнению с базовыми при использовании существующих поправочных коэффициентов и применении процедуры плавающего индекса обрабатываемости;

4) разработки экстраполяционных расчетов оптимальных режимов для областей факторного пространства, для которого отсутствуют прямые экспериментальные данные о стойкости инструментов, например, для сверл большого диаметра: 15...40 мм;

Программный комплекс позволяет повысить графическую наглядность рассчитываемых

режимов резания и облегчает технологю получение информации о дальнейшем их изменении как по производительности, так и по стойкости инструмента и по снижению производственных затрат.

Список литературы

1. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: справочник. В 2 т. Т. 1 / А.Д. Локтев и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с: ил. – ISBN 5-217-01190-4.
2. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я.Л. Гуревич и др. – М.: Машиностроение, 1976. – 176 с.
3. Островский В.И. Теория резания металлов. Расчет оптимальных режимов резания: учебное пособие. – Л.: СЗПИ, 1986. – 68 с.
4. Colding B., Konig W. Validity of the Taylor equation in metal cutting // CIRP Annals. – 1971. – Vol. 19, N 4. – P. 793–812.
5. Силин С.С., Баранов А.В., Рыкунов А.Н. Научно-обоснованное нормирование операций механообработки // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1996. – № 4. – С. 29–32.
6. Макаров А.Д., Износ и стойкость режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.
7. Грановский Г.И. О стойкости инструмента как исходном параметре для расчетов режима резания // Вестник машиностроения. – 1965. – № 8. – С. 59–60.
8. Varatharajulu M., Loganathan C., Baskar N. Influence of cutting parameters on burr height and burr thickness in drilling of Duplex 2205 using Solid Carbide // International Journal of ChemTech Research. – 2015. – N 8 (2). – P. 768–777.
9. Shunmugesh K., Panneerselvam K., Jospaul T. A nova based optimization of machining parameters in drilling of glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites // International Journal of Emerging Engineering Research and Technology. – 2014. – Vol. 2, iss. 3. – P. 53–60.
10. Иванцовский 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.
11. Gaitonde V.N., Karnik S.R. Selection of optimal process parameters for minimizing burr size in drilling using taguchi's quality loss function approach // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2012. – Vol. 34, N 3. – P. 238–245. – doi: 10.1590/S1678-58782012000300003.
12. Bădan I., Oancea Gh., Vasiloni M. Mathematical model for drilling cutting forces of 40CrMnMoS8-6 steel // Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences. – 2012. – Vol. 5 (54), N 1. – P. 31–38.
13. Kilickap E. Determination of optimum parameters on delamination in drilling of GFRP composites by Taguchi method // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. – 2010. – Vol. 17. – P. 265–274.
14. Shunmugesh K., Panneerselvam K., Jospaul T. Optimising drilling parameters of gfrp by using grey relational analysis // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 3, iss. 6. – P. 302–305.
15. Ficici F., Koksall S., Karacadag M.C. Optimization of cutting parameters for surface roughness of stainless steel in drilling process // International Journal of Science and Advanced Technology. – 2012. – Vol. 2, N 3. – P. 114–121.
16. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов / В.Ю. Попов, А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, В.Ю. Скиба // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 3 (23). – С. 68–74.
17. Selection of optimum drilling parameter in drilling of commercial acrylic sheet to achieve minimum hole expansion by using Taguchi approach / I. Khan, D. Luthra, M. Verma, S. Singh // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2012. – Vol. 4, iss. 4. – P. 1256–1261.
18. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebea, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – P. 1408–1411. – doi: 10.1080/10426914.2014.973595.
19. Manikandan C., Rajeswari B. Study of cutting parameters on drilling EN24 using Taguchi method // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2013. – Vol. 2, iss. 7. – P. 146–149.
20. Карманов В.С. Исследование математических моделей стойкости режущего инструмента // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 2 (23). – С. 55–64.
21. Смагин Г.И. Оптимизация режимов сверления по критерию минимума затрат: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 68 с.
22. Смагин Г.И., Карманов В.С. Алгоритм нормирования режимов резания труднообрабатываемых материалов по методу характеристических линий и поверхностей при использовании специальных планов эксперимента // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 3 (44). – С. 149–158.
23. Zuperl U., Cus F. Optimization of cutting conditions during machining by using neural networks // Proceedings of the 12th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Dresden, Germany, 15–17 July 2002. – Dresden, 2002. – P. 502–511.

24. *Dereli T., Filiz I.H., Baykasoglu A.* Optimizing cutting parameters in process planning of prismatic parts by using genetic algorithms // *International Journal of Production Research.* – 2001. – Vol. 39, iss. 15. – P. 3303–3328. – doi: 10.1080/00207540110057891.

25. *Deepak S.S.K.* Cutting speed and feed rate optimization for minimizing production time of turning process // *International Journal of Modern Engineering Research*, 2012. – Vol. 2, iss. 5. – P. 3398–3401.

26. *Ab Rashid M.F.F., Izwandi S.* Optimization of turning parameters to minimize production cost using

genetic algorithm [Electronic resource] // *Proceedings of the 2nd CUTSE International Conference*, Miri, Sarawak, Malaysia, 24–25 November 2009. – Sarawak, 2009. – Available at: http://umpir.ump.edu.my/5277/1/CUTSE_MOC_02_Optimization_of_Turning_Parameters_to_Minimize_Production_Cost.PDF (accessed: 30.10.2015).

27. *Kronenberg M.* Machining science and application. Theory and practice for operation and development of machining processes. – 1st ed. – Oxford: Pergamon Press, 1966. – 410 p.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 6–17

Use of basic model of process of drilling for rationing of the modes of cutting of the hardly processed materials

Smagin G.I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: g.smagin@ngs.ru

Karmanov V.S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: vitaly_karmanov@ngs.ru

Fedin I.V., Master's Degree student, e-mail: ivan_fedin@outlook.com

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

A method of cutting regimes normalization for hard-to-machine materials using the example of drilling operation is offered. The method is based on application of new models of tool life well consistent with the experiments results as well as on building characteristic lines and surfaces for the cutting process parameters. Applications of the suggested method allows using the mechanism of experimental tools lifetime for different zones of the cutting regimes factor space, which allows to decrease the number of labor-intensive AW experiments, improve accuracy of calculations of optimal processing conditions and graphic display of adopted resolutions. A scheduling algorithm for the experiment to estimate the selected resistibility model parameters is developed on the ground of the suggested method. On the basis of the suggested method a program complex is drawn up to calculate optimal drilling regimes on the criteria of minimal expenses for range diameters of drills (from 3 to 40 mm) and processed materials (with processing ratio of the material, PR, from 0,2 to 1).

The basic variables of the cutting process include the dimensions of tools, the applied criteria of tool life, the type of cooling lubricant, the mode of drill fixation, the drill radius, blind or through bore, the material grade, the drill material, the drill type and others. The method allows calculating both local optimal cutting regimes on the criteria of minimal expenses and the table regimes along the characteristic line of maximal life for the current variables for the moment feeds without considering the processing expenses.

Keywords:

drilling, drilling regimes, cutting tool life, normalization method, characteristic lines, characteristic surfaces, design of experiment, machinability of materials, correction coefficients, optimization, expenses.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-6-17

References

1. Loktev A.D., Gushchin I.F., Batuev V.A. et al. *Obshchemashinostroitel'nye normativy rezhimov rezaniya. Spravochnik. V 2 t. T. 1* [Engineering industry standards cutting modes. Manual. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 640 p. ISBN 5-217-01190-4

2. Gurevich Ya.L., Gorokhov Ya.V., Zakharov V.I. et al. *Rezhimy rezaniya trudnoobrabatyvaemykh materialov. Spravochnik* [Cutting hard materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 176 p.
3. Ostrovskii V.I. *Teoriya rezaniya metallov. Raschet optimal'nykh rezhimov rezaniya* [Theory of cutting. Calculation of optimum cutting conditions]. Leningrad, SZPI Publ., 1986. 68 p.
4. Colding B., Konig W. Validity of the Taylor equation in metal cutting. *CIRP Annals*, 1971, vol. 19, no. 4, pp. 793–812.
5. Silin S.S., Baranov A.V., Rykunov A.N. Nauchno-obosnovannoe normirovanie operatsii mekhanooabrotki [Science-based regulation of machining operations]. *Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny – Tractors and agricultural machinery*, 1996, no. 4, pp. 29–32.
6. Makarov A.D. *Iznos i stoikost' rezhushchikh instrumentov* [Wear resistance of cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 264 p.
7. Granovskii G.I. O stoikosti instrumenta kak iskhodnom parametre dlya raschetov rezhima rezaniya [About the tool life as the initial parameters for the calculation of cutting mode]. *Vestnik mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 1965, no. 8, pp. 59–60.
8. Varatharajulu M., Loganathan C., Baskar N. Influence of cutting parameters on burr height and burr thickness in drilling of Duplex 2205 using Solid Carbide. *International Journal of ChemTech Research*, 2015, vol. 8, no. 2, pp. 768–777.
9. Shunmugesh K., Panneerselvam K., Jospaul T. A nova based optimization of machining parameters in drilling of glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 2014, vol. 2, iss. 3, pp. 53–60.
10. Ivantsivsky V.V., Skeebe V.Yu. Sovmeshchenie operatsii poverkhnostnoi zakalki i finishnogo shlifovaniya na odnom tekhnologicheskoy oborudovaniy [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.
11. Gaitonde V.N., Karnik S.R. Selection of optimal process parameters for minimizing burr size in drilling using taguchi's quality loss function approach. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2012, vol. 34, iss. 3, pp. 238–245. doi: 10.1590/S1678-58782012000300003
12. Bădan I., Oancea Gh., Vasiloni M. Mathematical model for drilling cutting forces of 40CrMnMoS8-6 steel. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences*, 2012, vol. 5 (54), iss. 1, pp. 31–38.
13. Kilickap E. Determination of optimum parameters on delamination in drilling of GFRP composites by Taguchi method. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 2010, vol. 17, pp. 265–274.
14. Shunmugesh K., Panneerselvam K., Jospaul T. Optimising drilling parameters of GFRP by using grey relational analysis. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, vol. 3, iss. 6, pp. 302–305.
15. Ficici F., Koksall S., Karacadag M.C. Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness of Stainless Steel in Drilling Process. *International Journal of Science and Advanced Technology*, 2012, vol. 2, iss. 3, pp. 114–121.
16. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Skeebe V.Yu. Kontaknyye protsessy pri almaznoi obrabotke instrumental'nykh materialov [Contact processes in diamond processing of tool materials]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 3 (23), pp. 68–74.
17. Khan I., Luthra D., Verma M., Singh S. Selection of optimum drilling parameter in drilling of commercial acrylic sheet to achieve minimum hole expansion by using Taguchi approach. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2012, vol. 4, no. 04, pp. 1256–1261.
18. Skeebe V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12, pp. 1408–1411. doi: 10.1080/10426914.2014.973595.
19. Manikandan C., Rajeswari B. Study of cutting parameters on drilling EN24 using Taguchi method. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013, vol. 2, iss. 7, pp. 146–149.
20. Karmanov V.S. Issledovanie matematicheskikh modelei stoikosti rezhushchego instrumenta [Investigation of mathematical models of the cutting tool]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 2 (23), pp. 55–64.
21. Smagin G.I. *Optimizatsiya rezhimov sverleniya po kriteriyu minimuma zatrat* [Drilling optimization by the criterion of minimum cost]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. 68 p.
22. Smagin G.I., Karmanov V.S. Algoritmy normirovaniya rezhimov rezaniya trudnoobrabatyvaemykh materialov po metodu kharakteristicheskikh liniy i poverkhnostei pri ispol'zovanii spetsial'nykh planov eksperimenta [Algorithm

of norming cut modes of a hard preparing materials by charactical lines and surfaces method used special experimental plans]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 3 (44), pp. 149–158.

23. Zuperl U., Cus F. Optimization of cutting conditions during machining by using neural networks. *Proceedings of the 12th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, Dresden, Germany, 15–17 July 2002, pp. 502–511.

24. Dereli T., Filiz I.H., Baykasoglu A. Optimizing cutting parameters in process planning of prismatic parts by using genetic algorithms. *International Journal of Production Research*, 2001, vol. 39, iss. 15, pp. 3303–3328. doi: 10.1080/00207540110057891

25. Deepak S.S.K. Cutting speed and feed rate optimization for minimizing production time of turning process. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2012, vol. 2, iss. 5, pp. 3398–3401.

26. Ab Rashid M.F.F., Izwandi S. Optimization of Turning Parameters to Minimize Production Cost using Genetic Algorithm. *Proceedings of the 2nd CUTSE International Conference*, Miri, Sarawak, Malaysia, November 24–25, 2009. Available at: http://umpir.ump.edu.my/5277/1/CUTSE_MOC_02_Optimization_of_Turning_Parameters_to_Minimize_Production_Cost.PDF (accessed: 30.10.2015).

27. Kronenberg M. Machining science and application. Theory and practice for operation and development of machining processes. 1st ed. Oxford, Pergamon Press, 1966. 410 p.

Article history:

Received 2 July 2015

Revised 3 August 2015

Accepted 20 October 2015