



ВЪРХУ РЕШЕНИЕТО ЗА ОПТИМАЛЕН ИЗБОР НА МАТЕРИАЛ И ТЕХНОЛОГИЯ НА ОБРАБОТВАНЕ ОТ ДАДЕН КЛАС ИНСТРУМЕНТАЛНИ СТОМАНИ, РАБОТЕЩИ НА ГОРЕЩО

Николай Тончев

tontchev@vtu.bg

*доцент и доктор инж., Висше транспортно училище «Тодор Каблешков», Гео Милев 158
БЪЛГАРИЯ*

Резюме: Съобщението представя методика, въз основа на която е възможно от даден клас стомани да се подбере най-подходящата, съгласно дефиниран комплекс от свойства. Решението за този комплекс от свойства се формира от три вида векторни критерии – адитивен, песимистичен и мултипликативен и чрез приложено нормиране е възможно да се направят изводи, валидни за целия клас стомани. Методиката за пестене на енергия и/или материали се базира на многокритериалната оптимизация, използваща регресионни модели, описващи зависимостта на механичните свойства от параметрите на режима на обработване. Тя се основава на следния принцип: първоначално се решава многокритериалната задача за механичните свойства, в резултат на която се получават близки паретовски вектори, отличаващи се в енергийно отношение един спрямо друг и след отчитане на енергоемкостта се предписва най-изгодното в енергийно отношение решение.

Ключови думи: избор на материал, азотиране, моделиране, оптимизация.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Експлоатационната трайност, наеженост и конкурентоспособност на промишлените изделия зависят от използваните материали и от приложените разнообразни (механични, физични, химични и др.) въздействия върху тях. Особено съществен принос за постигането на необходимите качества на детайлите и съоръженията имат предварителното и окончателното термично и химикотермично обработване. С предварителната термична обработка преди азотиране се цели постигането на определени механични свойства на основата (якост, твърдост, жилавост), минимални вътрешни напрежения, облекчена следваща механична обработка, дребно зърно и други свойства (топлоустойчивост, структурна хомогенност и т.н.). Само след правилно подбрана и проведена предварителна термична обработка азотираният слой притежава комплекс от най-добри характеристики – твърдост, износоустойчивост, якост на умора, теплоустойчивост, голямо съпротивление срещу крехко разрушаване и т.н. В общия случай оптималните стойности на целевите параметри се получават при различни комбинации на управляващите (input) параметри, така че на практика е невъзможно едновременно оптимизиране (максимизиране) на всички целеви (output) параметри, още повече, че някои от тях са в обратно пропорционална зависимост помежду си [1].

2. ЦЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Това изследване има за цел да определи стомана от даден клас и режим за нейното обработване, осигуряващи най-висока експлоатационна трайност, при отчитане на енергоемкостта на технологията. Методиката за пестене на енергия и/или материали се базира на многокритериалната оптимизация, използваща регресионни модели, описващи зависимостта на механичните свойства от параметрите на режима на азотиране. Тя се основава на следния принцип: първоначално се решава многокритериалната задача за механичните свойства, в резултат на която се получават близки Паретовски вектори отличаващи се в енергийно отношение един спрямо друг и/или по отношение на количествата скъпи легиращи компоненти; след проведено отчитане на енергоемкостта се предписва най-изгодното в енергийно отношение решение.

Примерно определените за изследване стомани са типични представители на легираните инструментални стомани за работа на горещо и като такива, за потребителите им е от голямо значение да се определят онези режими на термична и химикотермична обработка, които осигуряват едновременно относително най-добра микротвърдост, жилавост на разрушаване и износоустойчивост.

3. МЕТОДИКА И ПОДХОД НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

В табл.1. е поместен химичен състав на стоманите от разглеждания клас. Трите разглеждани стомани в различните стандарти се означават както следва :

ГОСТ - 4X5MΦC, BS - BH11, AISI-H11, DIN 17350 - X38CrMoV51.

ГОСТ- 3X3M3Φ, BS-BH10, AISI - H10, DIN 17350 - X32CrMoV33.

ГОСТ - 3X2B8Φ, BS-BH21, AISI - H21, DIN 17350 - X30WCrV93.

В по-нататъшното описание са използвани означенията по ГОСТ, носещи в себе си информация за количеството легиращи елементи.

В табл. 2. са посочени основните механични и пластични характеристики на разглежданите стомани.

Таблица 1. Химичен състав на стоманите от разглеждания клас, [%]

Стомана	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V
I 4X5MΦC	0.32 - 0.4	0.9 - 1.2	0.2 - 0.5	4.5 - 5.5	1.2 - 1.5	-	0.3 - 0.5
II 3X3M3Φ	0.27 - 0.34	0.1 - 0.4	0.2 - 0.5	2.8 - 3.5	2.5 - 3	-	0.4 - 0.6
III 3X2B8Φ	0.3 - 0.4	0.15 - 0.4	0.15 - 0.4	2.2 - 2.7	до 0.5	7.5 - 8.5	0.2 - 0.5

Таблица 2. Характеристики на изследваните стомани

Стомана	Rm [MPa]	Re [MPa]	A [%]	Z [%]	KCU [kJ/m ²]
I 4X5MΦC	1750	1480	-	-	570
II 3X3M3Φ	1670	1470	-	50	220
III 3X2B8Φ	1530	1390	12	36	200

За разгледаният пример обектът за оптимизация са свойствата на инструменталните стомани, предназначени за работа на горещо (микротвърдост, жилавост на разрушаване и износоустойчивост) след процеса на йонно азотиране.

За да се осигури управлението на обекта, трябва да има управляващи параметри (степен на свобода), които се изменят независимо един от друг, вследствие на което се получават множество варианти на състоянието на обекта, от които се избира най-добрият. В табл.3. е посочен диапазонът на изменение на управляващите режима на термично и химикотермично обработване параметри. С изменението на технологичните фактори на процеса се изпълнява планиран експеримент (оптимално-композиционен план), вследствие на който се извеждат модели, проверени за адекватност. Зюмбилев, (1992) е определил зависимостта между целеви параметри и технологични фактори на режима на обработване.

Въз основа на литературните данни и на предварително проведените експерименти, в [2] са определени следните входящи (управляващи) фактори: температура на азотиране, налягане, продължителност на процеса и температура на отвърщане. При подбора на тези фактори са спазени следните изисквания: независимост един от друг, съвместимост между тях и способност да се управляват.

Описанието на тази връзка за конкретния случай е определена както следва:

Таблица. 3. Диапазон на изменение на управляващите режима на термично и химикотермично обработване параметри

Фактори	$T_{аз}$	P	τ	$T_{отвр.}$
	[°C]	[Pa]	[h]	[°C]
	Нива X	X_1	X_2	X_3
Нулево ниво (0)	530	300	7	650
Интервал на вариране	20	150	3	50
Горно ниво (+I)	550	450	10	700
Долно ниво (-I)	510	150	4	600

Базирайки се на влиянието на отделните фактори върху азотирането и целите, които се преследат, са избрани следните параметри на оптимизация (целеви фактори): максимална микротвърдост на слоя $H_{\mu V}$, относителна степен на износване K_v и жилавост на разрушаване $K_{1c}(K_Q)$.

С избраните по този начин фактори и интервали се планира експеримент и въз основа на съставен план от различни комбинации на параметрите на режимите на обработване, с които са проведени опитите. С цел намаляване на грешките се препоръчва всеки опит да се провежда два пъти, а комбинациите от нулевото ниво на факторите - пет пъти. Всички образци са йонно азотирани в инсталация, тип ЙОН-20. Насищаният газ при азотирането в тлеещ разряд е газообразен амоняк. След азотиране образците се охлаждат на въздух.

В разглежданият пример е необходимо да се определят технологичните параметри термичното и химикотермичното обработване, осигуряващи едновременно максимални микротвърдост и жилавост на разрушаване и минимално износване.

Изискванията към всеки критерий $Q_j(x)$ са различни и оптималното решение x^* не може да удовлетвори максимално всичките. Тогава се формулира така наречената задача за многокритериална оптимизация (векторна оптимизация, компромисна оптимизация).

Задачата за оптимизация е, да се намерят такива стойности на управляващите параметри $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, за които се изпълнява условието: $Q(x^*) = Q(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = Q_{max} > Q(x_1, x_2, \dots, x_n)$

При разглежданата задача целесъобразността на процеса йонно азотиране и предизвиканите от него параметри на качеството съставляват от множеството целеви параметри (y_1, y_2, \dots, y_m). Оптималните стойности на различните целеви параметри обикновено се получават при различни стойности на множеството управляващи параметри (x_1, x_2, \dots, x_n), а оптимизацията само по един критерий не винаги е най-доброто решение.

За разглежданият пример по-долу е посочена връзката между технологичните фактори и целевите примери. Методиките за определянето им са дадени в [2].

За стомана **4X5MΦС**

$$HV_{01} = 11914,4 + 254,13X_1 - 143,65X_2 + 134,44X_3 - 274,03X_4 - 51,50X_1^2 + 248,75X_1X_2 - 88,75X_1X_3 - 136,25X_1X_4 - 624,00X_2^2 - 301,25X_2X_3 + 76,25X_2X_4 - 194,00X_3^2 - 36,25X_3X_4 - 144,00X_4^2$$

$$K_Q = Y_4 = 83,2 - 1,52X_1 + 5,3X_2 + 3,77X_3 + 1,89X_4 - 3,75X_1^2 + 4,63X_1X_2 - 4,00X_2^2 - 3,5X_4^2$$

$$K_V = 0,4020 - 0,0828X_1 + 0,0033X_2 - 0,0523X_3 - 0,0008X_4 + 0,0037X_1^2 + 0,0106X_1X_2 + 0,0244X_1X_3 - 0,0006X_1X_4 + 0,0087X_2^2 - 0,0469X_2X_3 + 0,0031X_2X_4 + 0,0237X_3 + 0,0093X_3X_4 + 0,0512X_4^2$$

За стомана **3X3M3Φ**

$$HV_{01} = 11527,2 - 129,5X_1 + 150,41X_2 - 292,02X_4 + 87,50X_1X_2 - 62,50X_1X_3 - 75X_2X_3 - 137,50X_2X_4 - 234,5X_3^2 - 137,50X_3X_4 - 194,50X_4^2$$

$$K_Q = Y_8 = 74,76 - 2,24X_1 - 1,76X_2 - 0,52X_3 + 19,06X_4 - 16,1X_1^2 + 2,13X_1X_2 - 2,5X_1X_3 - X_1X_4 - 17,35X_2^2 + 1,25X_2X_3 - 2,25X_2X_4 + 14,65X_3^2 + 0,88X_3X_4 - 8,85X_4^2$$

$$K_V = 0,3898 - 0,0786X_1 - 0,0099X_2 - 0,0494X_3 + 0,0151X_4 + 0,0307X_1^2 + 0,0131X_1X_2 + 0,0044X_1X_3 + 0,0157X_1X_4 + 0,0257X_2^2 - 0,0494X_2X_3 + 0,0243X_2X_4 + 0,0107X_3^2 - 0,0218X_3X_4 + 0,0457X_4^2$$

За стомана **3X2B8Φ**

$$HV_{01} = 11074,8 - 92,33X_2 + 97,99X_3 - 514,46X_4 + 117,00X_1^2 + 86,25X_1X_3 + 311,25X_1X_4 - 93,00X_2^2 - 273,75X_2X_3 - 173,75X_3X_4 - 85,50X_4^2$$

$$K_Q = Y_{12} = 40,52 - 9,3X_1 - 1,8X_2 - 3,49X_3 + 13,49X_4 - 2,7X_1^2 + 0,625X_1X_2 - 5,25X_1X_4 - 2,20X_2^2 + 0,125X_2X_3 - 2,95X_3 - 3,38X_3X_4 + 13,05X_4^2$$

$$K_V = Y_{14} = 0,3804 - 0,0804X_1 - 0,0076X_2 - 0,0504X_3 + 0,0300X_4 + 0,0156X_1^2 + 0,0050X_1X_2 - 0,0025X_1X_3 + 0,0037X_1X_4 + 0,385X_2^2 - 0,054X_2X_4 - 0,029X_3^2 - 0,037X_3X_4 + 0,059X_4^2$$

Съществуват различни концепции за решаване на оптимизационните задачи с няколко критерия за оптималност. До неотдавна решението на подобни задачи се смяташе за некоректно предвид на това, че те нямат едно-единствено решение. Въпреки това необходимостта от решаването на множество практически задачи с векторен критерий е довела до развитието на много методи за компромисни оптимални решения.

Най-често използваният подход при решаване на задачата за векторна оптимизация е тя да се преобразува в задача за скаларна оптимизация.

В зависимост от изискванията към критериите се мени и Парето-оптималната област. При методите за скаларизация и компромисни решения, в зависимост от приетата схема за компромис, се препоръчва една оптимална точка, която максимално да удовлетворява обобщаващия скаларен критерий (максимум полезност, минимум загуби от утопичното решение, максимална желателност и др.).

След като критериите, формиращи многокритериалната задача се приведат в безразмерни функции $\eta(x)$ в интервала $[0,100]$, то следващата стъпка в решаването на задачата за многокритериално вземане на решение е формирането на скаларизираща функция, която да обединява в себе си трансформациите на отделните критерии.

Няколко вида скаларизации са особено разпространени в инженерната практика [3]:

А) Песимистична функция - определяне на максималната стойност от обобщените минимални стойности на трансформациите -

$$m(x) = \min_{i=1, \dots, k} \{f_i(x)\}$$

Б) Адитивна (средноаритметична) функция (Keeny, 1974):

Тази функция се базира на средно-аритметичното от сумата на трансформациите

$$l(x) = \sum_{i=1}^k \frac{f_i(x) + \dots + f_k(x)}{k}$$

В) Мултипликативна (средно-геометрична) функция

Скаларизиращата функция се базира на средно-геометричното от произведението на трансформациите - $g(x) = \sqrt[k]{f_1(x) \dots f_k(x)}$.

Общата схема на подхода [4] може да се представи както следва:

1. Генериране на MCDM модел (многокритериален модел за вземане на решение). За целта се използват регресионни модели, изведени в [2]. Като резултат от първата стъпка се получава задача за нелинейно многофакторно обектно програмиране. Дефинирането на MCDM модела изисква да се определят желаните диапазони на изменение на критериите.

2. Изпълнява се подходяща дискретизация на множеството на променливите.

Например при използване на интервала [-1, 1] се препоръчва стъпка определена от възможностите на технологичното оборудване. За разглеждания случай стъпката на дискретизация е 0.25.

3. Внедряване на MCDM стратегия, определена скаларизираща функция комбинираща евристично правило с трансформационно свойство и взаимодействаща с лицето, вземащо решение (ЛВР).

4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

При прилагането на този подход се получиха следните резултати за механичните свойства на изследваните стомани при съответните режими на обработване.

Таблица. 4. Стойности на целевите параметри при съответните технологични фактори

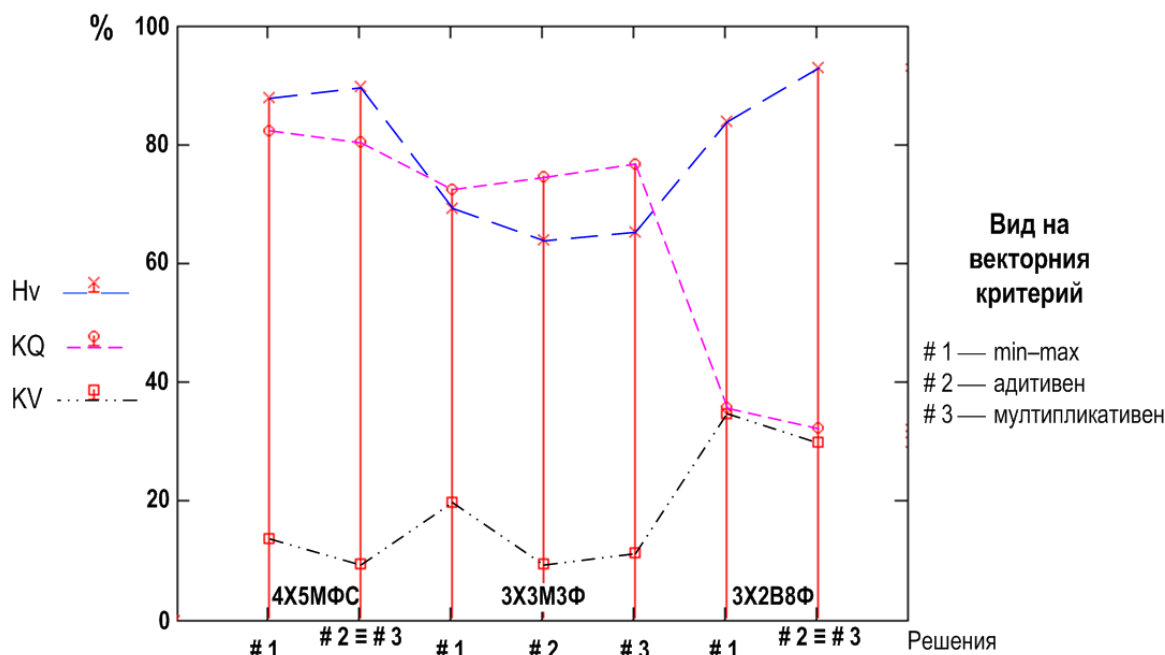
параметри	4X5MΦС		3X3M3Φ			3X2B8Φ	
	#1	#2 ≡ #3	#1	#2	#3	#1	#2 ≡ #3
X ₁	0.5	1	-0.25	0.25	0	-1	-1
X ₂	0.25	0.25	0.0	0.5	0.5	-0.25	-0.25
X ₃	0.75	0.75	0.25	1	1	0	1
X ₄	-0.5	-0.25	0	-0.25	-0.25	-1	-1
H _v	12060	12110	11550	11410	11440	11950	12200
K _Q	84.16	82.29	75.25	77.18	79.04	41.89	38.80
K _v	0.348	0.312	0.399	0.313	0.329	0.523	0.483

Посочените в табл. 4. резултати са изведени за кодираните стойности на факторите поради обстоятелството, че те така се определят от регресионните модели. Стойностите целевите параметри, посочени в табл. 4. могат да се нормират съответно спрямо най-малката и най-голямата стойности на разглежданата характеристика от дадения клас.

Тъй като тази нормировка е обща за трите стомани може да се осъществи подреждане на оптималните стойности на параметрите, което е осъществено на фиг. П. 24. Съгласно това ранжиране може да определи окончателното решение едновременно спрямо трите целевит параметри.

Относителната за единица време изразходена мощност за процеса на йонно азотиране [5] е –

$$Q(X_1, X_2) = 1.13 + 0.0837 X_1 + 0.0563 X_2 + 0.008 X_1^2 - 0.0176 X_1 X_2 - 0.0123 X_2^2$$



Фиг. 1. Решения на многокритериалната задача за разглеждания клас стомани при различни стойности на векторния критерий

Съвместният анализ на табл. II. 4, фиг. 1 с изразходената мощност, определя решение #1 на стомана 4X5MФC, като най-ефективно. Решенията за стоманите 3X3M3Ф и 3X2B8Ф, посочени в табл.4. са по-приемливи в енергийно отношение но те имат значително по неблагоприятни стойности на изследваните механични показатели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена е методика, с помощта, на която лицето, вземащо решение е възможно от съответен клас стомани да избере материал и режим на съответно му обработване, осигуряващи относително най-високи стойности на оптимизиращите параметри, при отчитане на енергийните разходи. Използван е сравнителният анализ за дефиниран пример и са определени фамилия компромисни решения за клас стомани, работещи на горещо, от който е определен представител, гарантиращ постигането на желан комплекс от свойства.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тошков В., А. Зюмбилев, Н.Тончев, Върху многокритериалната оптимизация на свойствата на йонно азотирани стомани, АМТЕХ'95, стр. 216-224, Русе, 1995.
- [2] Зюмбилев А. Влияние на азотирането в нискотемпературна плазма върху свойствата на инструментални стомани за гореща обработка, Дисертация, 1992, София.
- [3] Стоянов, С., Оптимизация на технологични процеси, Техника, София, 1993.
- [4] Tontchev N.T., L. Kirilov , Two Approaches for Solving Multiple Criteria Decision Making (MCDM) Problems with an Illustrative Example, PROBLEMS OF ENGINEERING, CYBERNETICS AND ROBOTICS, 58, 2007, 53-63 2007.
- [5] Тошков В., Н.Тончев, А. Зюмбилев, Върху минимизирането на енергийните разходи на стомани в тлеещ разряд, Юбилейна научна сесия, Сборник 50 години ТУ – София, стр. 32-37, 1995.

THE SOLUTION FOR OPTIMAL CHOICE OF MATERIALS AND PROCESSING TECHNOLOGIES ABOUT A GIVEN CLASS OF TOOL STEELS ACTIVE IN HOT ENVIRONMENTS

Nikolay Tontchev

University of Transport, 1574, Sofia, 158 Geo Milev Str.
BULGARIA

Keywords: *material selection , modeling, optimization, ion nitriding*

Abstract: *The announcement presents a methodology enabling the choice of the most convenient steel from a given class of steels related to a defined set of properties. The solution of this set of properties is formed based on three types of vector criteria – additive, pessimistic and multiplicative; it is possible to make corollaries that are valid for the whole class of steels via applied normalization. This methodology of power reduction and/or of materials is based on a multicriteria optimization using regression models that describe dependencies of mechanical properties from the processing mode parameters. It is based on the following principle: at first a multicriteria problem is solved about the mechanical properties that cause near Pareto vectors differing one from the other from the point of view of the power consumption; after the execution of a power check and/or material expenditure, the most convenient solution is prescribed with respect to the power consumption and/or material expenses.*