

Tratamiento térmico de aceros para herramientas en hornos de vacío con temple de gas

Parte 1. Requerimientos del proceso y simulaciones

*Dra. Emilia Wołowiec, Prof. Piotr Kula - Universidad Técnica de Lodz, Lodz, Polonia
Dr. Maciej Korecki, Ing. Józef Olejnik - SECO/WARWICK S.A. Swiebodzin, Polonia*

En pocas palabras

Los aceros para herramientas constituyen el material básico para la formación de todos los grupos de materiales y la fabricación de herramientas. Un proceso de enfriamiento adecuadamente diseñado y controlado es de gran importancia para el efecto final del tratamiento térmico y por lo tanto es subyacente para la durabilidad y la idoneidad del elemento tratado.

Los equipos y tecnologías de tratamiento térmico contemporáneas facilitan el tratamiento térmico masivo y efectivo de los aceros para herramientas, mientras que los simuladores de proceso, como G-Quench Pro[®] permiten diseñar nuevos métodos de tratamiento con la reducción simultánea de procedimientos de prueba que por lo general consumen mucho tiempo.

Introducción

Los aceros para herramientas son un material ampliamente utilizado para la fabricación de herramientas de metal, polímero, cerámica y herramientas de compuestos que pueden formarse por maquinado o conformación de plástico. Dado que el requisito fundamental para una herramienta es la estabilidad de su forma, se espera que el material del que está hecho pueda sostener la carga sin deformar el plástico y ser altamente resistente a la abrasión.

Los aceros para herramientas se clasifican de acuerdo a las aplicaciones. Troqueles,

punzones, matrices de estampado, rodillos de prensado y otras herramientas diseñadas para el procesamiento en frío se hacen de acero de aleación de trabajo en frío como NCLV, NC10, NC11LV, NZ3 (aunque en la práctica tanto el material como las herramientas se calientan ligeramente durante el trabajo como resultado de la fricción o el trabajo de deformación). Los troqueles de extrusión de grandes dimensiones, moldes de fundición de presión, mandriles, punzones y otros elementos para el trabajo de plástico de otros materiales se calentaron a temperaturas más altas (en el rango de 250 a 700°C) están hechas de aleaciones de acero de trabajo en caliente (como WCL, WCLV, WNLV, etc.). Se espera que este grupo de materiales muestre un alto grado de dureza, resistencia a la abrasión, resistencia al impacto y buena capacidad de endurecimiento. El tercer grupo está formado por aceros de alta velocidad (por ejemplo SW7M, SW18, SK5M) aplica principalmente para maquinar metales a altas velocidades (cortadoras, taladros, fresas).

En términos generales, todos los aceros de herramientas adecuadamente templados, se caracterizan por una elevada dureza, resistencia a la abrasión, poca deformabilidad y poca susceptibilidad al sobrecalentamiento. Debido a que las cualidades básicas de los grados de acero (resistencia a la abrasión, fuerza, resistencia a las grietas, ductilidad) dependen en gran medida de la dureza obtenida, es que este parámetro atrae tanto la atención. Los procesos de templeo correc-

tamente ejecutados, son de gran importancia para la dureza objetivo de los elementos de acero y por lo tanto determina su idoneidad funcional.

Tratamiento térmico de aceros de herramientas

El tratamiento térmico de los aceros de herramientas consiste en un proceso de endurecimiento seguido inmediatamente por un proceso de templado, lo que asegura la adecuada estructura del material. Se debe mencionar en este punto que la composición química adecuadamente seleccionada tiene gran influencia en las propiedades de dichos materiales. Sin embargo, esto está más allá del alcance de este trabajo. Los aceros para herramientas requieren un tratamiento de precisión, por lo general individualizado para cada tipo de acero. Las directrices detalladas se encuentran en literatura propia del sector y en las especificaciones de los materiales de los fabricantes, mientras que los nuevos conceptos y tendencias sobre tratamiento térmico se discuten en revistas especializadas y en eventos del sector de tratamiento térmico HT ^[1-4]. Sin embargo, se pueden encontrar ciertas similitudes dentro de los grupos de aplicación de esos aceros.

El templado de los aceros para herramientas de trabajo en frío debe garantizar que el acero es de grano fino, resistente a la abrasión y al desgaste. Tales propiedades se consiguen al realizar un proceso en el cual algunos de los carburos no se disuelven en la austenita. Por lo tanto, en la práctica esos aceros se templan en aceite a temperaturas que van hasta 960°C.

Los aceros para trabajo en caliente se templan en aceite o en gas a temperaturas de hasta 1120°C y luego se templan a temperaturas de hasta 600°C. La temperatura de austenización es un compromiso entre la necesidad de limitar el crecimiento de granos de austenita y la necesidad de disolver los carburos de la aleación. Dependiendo

del tamaño de la herramienta, el proceso de templado está dirigido a la obtención de una estructura de martensita (para elementos más pequeños) o martensita con bainita (para las herramientas más grandes). A esto le sigue doble templado a una temperatura por encima del punto de dureza secundaria con el fin de reducir la austenita retenida y para aumentar la ductilidad y la resistencia a la fatiga térmica. En ocasiones se introducen procesos complementarios, por ejemplo la aplicación de varios revestimientos (CVD, PVD) o nitruración, que además aumentan la dureza de las superficies de trabajo de las herramientas tratadas y mejoran su resistencia a la abrasión y a la corrosión.

Los aceros de alta velocidad se templan en aceite o en gas a temperaturas de hasta 1250°C y después se templan a temperaturas entre 500-600°C

Un tratamiento térmico correctamente realizado es decisivo para las propiedades mecánicas y funcionales de las herramientas y la economía de su aplicación. Permitir cualquier irregularidad conduce a un desgaste más rápido, a la deformación o defecto de los elementos funcionales o en casos extremos, a daño (agrietamiento) en cuanto se someten a tratamiento de calor, lo que provoca pérdidas económicas notables. Demás está decir que, la calidad adecuada y el estado del material inicial son también muy importantes.

Las dificultades para garantizar la calidad de las herramientas de gran tamaño (molinos y troqueles) han llevado a la creación de normas de procesamiento. Las más conocidas son las publicadas por la NADCA (Asociación norteamericana de fundición) ^[5] y las publicadas por los líderes en la industria automotriz, entre otras las preocupaciones de Ford ^[6] y General Motors ^[7]. Estas normas se aplican principalmente a la calidad del acero H13 (WCLV) y a sus modificaciones: en relación con el control de calidad del material inicial, directrices para la realización y el control de los pro-

cesos de tratamiento térmico (HT) y la investigación de los resultados.

Directrices para el tratamiento térmico de herramientas de acero para trabajar en caliente según la NADCA

De acuerdo con la NADCA, el proceso de tratamiento térmico se debe realizar en un horno de vacío con temple de gas a alta presión, mientras que las temperaturas de la superficie y el núcleo de una pieza de trabajo procesada es vigilada y controlada (la ubicación exacta de los termopares de carga de trabajo está predeterminada).

El calentamiento hasta la temperatura de austenización se efectúa gradualmente para que no exista diferencia significativa en la temperatura. La primera parada en el calentamiento es a la temperatura de aprox. 650°C y continúa hasta que la diferencia de temperatura entre el núcleo y la superficie es inferior a 110°C (prácticamente muy por debajo de eso). La siguiente parada es programada a los 850°C y continúa hasta que las temperaturas se igualan, siempre y cuando la diferencia no exceda 14°C. Finalmente, la temperatura de austenización de 1030°C se alcanza y es cuando inicia la homogeneización de temperaturas durante 30 minutos hasta que las temperaturas se igualan (con un diferencia de temperatura aceptable por debajo de los 14°C) o por un máximo de 90 minutos a partir de que la superficie llegó a 1030°C. Estas directrices limitan las deformaciones térmicas y el crecimiento excesivo del grano austenítico.

Los troqueles se endurecen al templarse a la velocidad máxima hasta una temperatura de 150°C en el núcleo. La relación media de templado en la superficie hasta 540°C debe ser de al menos 28°C/min. En el caso de troqueles de gran tamaño (de secciones transversales mayores a 300 mm), se usa enfriamiento isotérmico a la temperatura superficial de 400-450°C cuando la temperatura del núcleo se desvía más de 100°C.

La parada isotérmica se termina cuando se produce una de las siguientes condiciones:

- la temperatura del núcleo difiere de la temperatura de la superficie en más de 100°C
- la temperatura de la superficie cae por debajo de los 400°C
- han transcurrido 30 minutos desde el inicio de la parada isotérmica.

El templado continúa hasta que se obtienen 50°C en el núcleo, tras lo cual inicia inmediatamente el revenido

Las cargas de trabajo no deben enfriarse por debajo de la temperatura de 33°C. La velocidad de enfriamiento requerida es esencial debido al riesgo de emisión de carburos en los límites del grano, lo que resulta en un deterioro de la resistencia al impacto. El enfriamiento isotérmico restringe la diferencia de temperatura de la superficie y el núcleo y por lo tanto disminuye las tensiones y deformaciones, protege la pieza contra el agrietamiento y evita la creación de una estructura perlítica.

El primer revenido se realiza a una temperatura de mínimo 565°C por retención durante el tiempo que depende de la sección transversal de la herramienta (1h/25 mm), pero no menor a 2 horas. A esto le sigue el enfriamiento a temperatura ambiente y el segundo revenido a una temperatura no inferior a 550°C. El tercer revenido no es necesario y se aplica sólo para la corrección final de la dureza. Los procesos de revenido reducen las tensiones internas, garantizan la estabilidad dimensional y la estructura adecuada, así como la dureza requerida, normalmente dentro del intervalo de 42-52 HRC.



Fig. 1. Horno de vacío horizontal modelo 15.0 VPT (SECO/WARWICK)

Horno de vacío con temple a gas

Los requisitos establecidos por la NADCA sobre el tratamiento térmico de moldes y troqueles son factible en un horno de vacío de una sola cámara, equipado con el sistema de templado de gas a alta presión de gas (tipo HPGQ) [8-13]. La empresa nacional SECO/WARWICK ha desarrollado una serie de hornos del tipo 15.0 VPT dedicados especialmente para el tratamiento térmico de herramientas. Estos hornos cumplen con los requisitos más exigentes establecidos por el sector de las herramientas y se entregan a clientes de todo el mundo (Europa, EE.UU., México, Brasil, China, India, e incluso Australia). Los hornos con zonas de trabajo de distinto volumen están disponibles desde 400/400/600 mm hasta 600/600/900, 900/800/1200,

1200/1200/1800 mm y más grandes, con sistema de carga horizontal o vertical (Fig. 1).

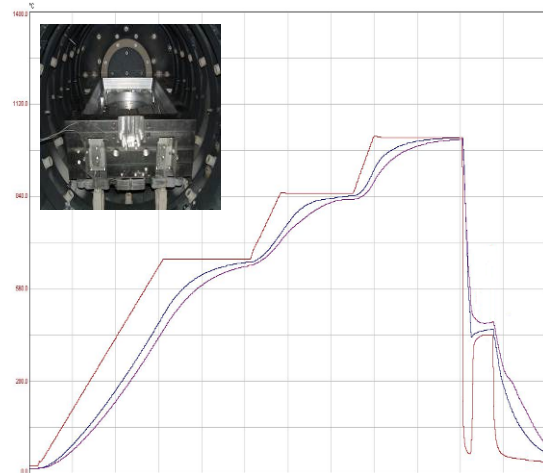


Fig.2. Austenización y temple con parada isotérmica y con monitoreo de la temperatura del horno y la temperatura de la superficie y núcleo del troquel.

Los hornos cuentan con un diseño compacto y como no emiten contaminantes u otros agentes nocivos, pueden ser instalados y operados en espacios de trabajo limpios. Están equipados con una cámara de calentamiento de grafito que permite calentar la carga de trabajo a la temperatura de 1300°C con uniformidad de +/- 5°C o mejor. Esto se consigue debido a los elementos de calentamiento colocados circunferencialmente que proporcionan calentamiento por radiación en vacío y gas inerte (convección, sistema ConFlap), que garantiza un calentamiento eficaz y uniforme también a bajas temperaturas. El horno hace el templado en gas inerte a alta presión (15 atm) forzado a un circuito cerrado mediante un ventilador. El gas de enfriamiento es forzado a través de las boquillas circunferencialmente colocadas directamente sobre la carga de trabajo de donde se recoge el calor y se pasa al intercambiador de calor interno. El sistema de enfriamiento proporciona garantiza el temple isotérmico mediante el control de la intensidad de enfriamiento con la presión de gas y la capacidad del ventilador (Fig. 2). La eficacia del enfriamiento a gas en hornos 15.0 VPT se validó a través de pruebas

usando como referencia un bloque de acero de 400/400/400 mm (Fig.3) al alcanzar velocidades de 40 a 80°C/min (cf. requerido por NADCA -28°C/min y GM -39°C/min).

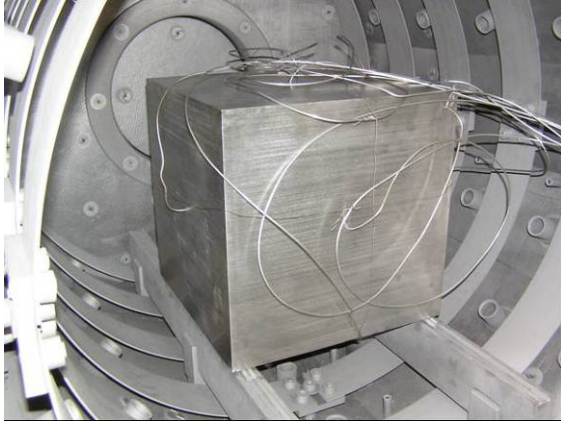


Fig.3. Prueba de velocidad de templado de acuerdo a NADCA usando como referencia un bloque de acero de 400/400/400 mm

Un horno de vacío permite llevar a cabo todo el tratamiento en una sola unidad, sin la transferencia de la carga y en un solo ciclo de trabajo que contiene las siguientes etapas posteriores: calentamiento para austenización, temple isotérmico, revenido repetido y también nitruración. El proceso se puede monitorear a través de los termopares de la carga colocados en un lugar opcional en el troquel. El efecto del tratamiento ejecutado en vacío y con gases inertes son las superficies idealmente limpias de las piezas de trabajo (Fig. 4).

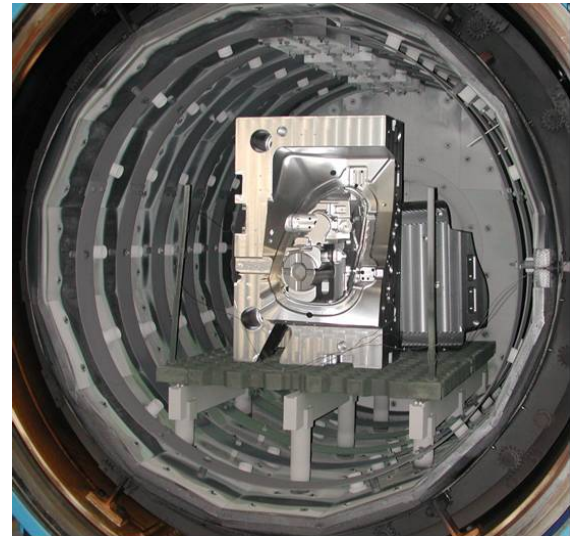


Fig.4. Un troquel en la cámara del horno de vacío tras tratamiento térmico complejo

Simulador de templado de acero para herramientas

Es de suma importancia determinar las interdependencias entre la estructura, el proceso tecnológico y las propiedades funcionales para la correcta y óptima fabricación de herramientas. La selección del material apropiado combinado con una tecnología apropiada asegura la mejor durabilidad del producto al menor costo.

El acelerado avance de la civilización ha propiciado el aumento de las expectativas de los consumidores en una serie de industrias, en relación a la calidad y durabilidad del producto, esperando de manera simultánea la reducción al mínimo de las emisiones peligrosas y del consumo de energía. Esto a su vez ha dado lugar a una serie de cambios en el planteamiento de la fabricación.

Actualmente el método tradicional para alcanzar propiedades óptimas del producto y los parámetros tecnológicos por prueba y error se ha reemplazado con métodos de simulación y predicción, que permiten que el producto y su tecnología sean diseñados por computadora. En muchos casos, la computadora se ha hecho cargo del control de la fabricación, mientras que la creciente

popularidad de esta solución se ha hecho visible en el aumento del mercado de los equipos digitales. El tratamiento térmico también ha sido testigo del interés en las aplicaciones para el modelado y simulación de procesos. Esto tiene que ver con el proceso tecnológico en sí, así como con las propiedades finales de los elementos tratados térmicamente [14-19].

El software de simulación de uso general solo toma en cuenta los parámetros estándar de un fenómeno dado, lo que deriva en que los resultados finales estén sujetos a un error. Un método para aumentar la precisión de los cálculos es tener en cuenta los parámetros del entorno en el cual se efectúa un proceso, en este caso las características individuales de un horno de temple, como es el caso con el simulador G-Quench Pro. Puede parecer que las propiedades individuales de una máquina atarían la aplicación a un equipo determinado y por lo tanto es inútil para los demás. Sin embargo, la parametrización adecuada de la configuración permite retener la versatilidad del software, de tal modo que se puede utilizar en diversos equipos. A pesar de lo anterior, esta solución rara vez se encuentra en la práctica industrial.

cipios matemáticos del proceso de templado y la dependencia de la dureza del material del tiempo de templado, se han desarrollado a partir de las investigaciones realizadas en la Universidad de Tecnología de Lodz, Polonia y en la empresa SECO/WARWICK con la debida consideración de la literatura disponible.

Un resultado directo de dicha simulación es poder determinar una curva de enfriamiento para un material dado bajo condiciones dadas. La curva de enfriamiento se determina con base en los parámetros del material, el proceso y la pieza de trabajo como, la temperatura de templado, la presión y el tipo gas para enfriamiento, las dimensiones y la curvatura de la pieza y la densidad de piezas en la cámara de templado. Combinado con un diagrama de fase individual para el material, la curva proporciona información sobre las fases por las que pasa el acero durante el tratamiento. El efecto final de la simulación es la determinación de la velocidad de templado y la dureza final prevista del material.

Como se mencionó anteriormente, los parámetros individuales de una unidad de templado determinan en gran medida el proceso real y, como resultado, los mismos parámetros preajustados en dos unidades diferentes, pueden dar como resultado acero endurecido de manera diferente. Por lo tanto, en la etapa de instalación, el software se configura para un equipo físico en particular asignado. De esta manera las características individuales de un horno también son tomadas en cuenta al definir las propiedades finales del producto.

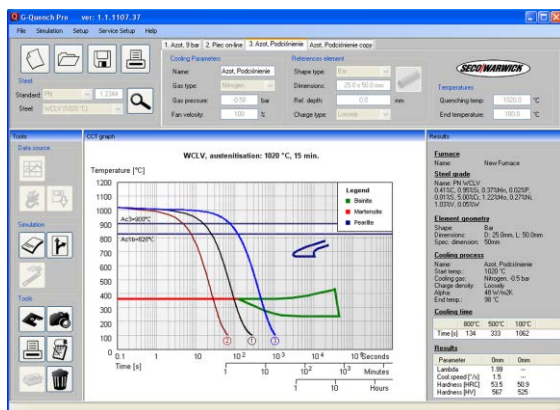


Fig. 5. Vista general de un software para la simulación y control de procesos de temple de acero para herramientas

El software G-Quench Pro (Fig.5) se usa para simular y controlar el temple en gas de acero para herramientas, reduciendo así la necesidad de ejecutar pruebas. Los prin-

Control del proceso de templado

El monitoreo del proceso de templado es un elemento esencial del ciclo de fabricación. Aunque el control del proceso es un procedimiento cíclico y ocurre en todas las etapas de la producción (diseño, proceso, pruebas de producto final), aquí es excepcionalmente importante ya que es la última

etapa que ofrece la posibilidad de intervenir y cambiar los parámetros del templado. La prueba del producto final se limita a tener la posibilidad de reconocer un tratamiento defectuoso. Por otro lado, la supervisión del proceso de templado en tiempo real permite la intervención inmediata del operador en caso de encontrarse cualquier irregularidad en el progreso del tratamiento.

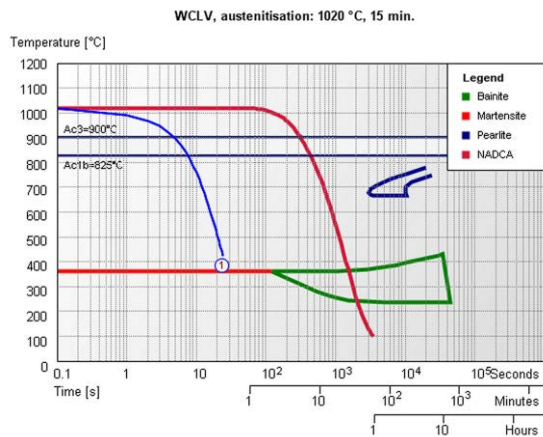


Fig. 6. Monitoreo del progreso adecuado en el proceso de templado en tiempo real mediante el software G-Quench Pro.

En el modo de monitoreo el software requiere una conexión remota o directa a la unidad de templado. En operación conjunta con la computadora del horno, descarga información sobre la temperatura actual en la cámara o en la pieza templada y después representa las lecturas en un diagrama de fase. La curva de proceso en tiempo real se representa gráficamente sobre la curva de enfriamiento determinada por el simulador (Fig. 6). De esta manera el proceso de enfriamiento se somete a la verificación actual.

Resumen

Los aceros para herramientas constituyen el material básico para la formación de todo tipo de materiales y la fabricación de herramientas. Un proceso de enfriamiento adecuadamente diseñado y controlado es de gran importancia para el efecto final del

tratamiento térmico y por lo tanto es subyacente para la durabilidad y la idoneidad del elemento tratado. Los equipos y tecnologías de tratamiento térmico contemporáneos facilitan el tratamiento térmico masivo y efectivo de los aceros para herramientas, mientras que los simuladores de proceso de templado permiten predecir los resultados del proceso con la reducción simultánea de los tardados procedimientos de prueba.

Bibliografía

- [1] M. Korecki, J. Olejnik, R. Gorockiewicz: Rozwój pieców HPQ na przykładzie aplikacji nawęglania próżniowego FineCarb, obróbki cieplnej stali HSLA oraz nowoczesnej obróbki cieplnej narzędzi. XI Seminarium Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej. Bukowy Dworek 2007.
- [2] M. Korecki, J. Olejnik, Z. Szczerba, M. Bazel: Jednokomorowy piec próżniowy HPGQ z efektywnością hartowania porównywalną z olejem. IV Konferencja Naukowa Nowoczesne Technologie w Inżynierii Powierzchni. Spała 2010.
- [3] E. Wołowicz, L. Małdziński, M. Korecki: Komputerowe narzędzia wspierające obróbkę cieplną i cieplno-chemiczną. Piece Przemysłowe & Kotły XI/XII 2011, 8-14.
- [4] E. Wołowicz, P. Kula, M. Korecki, J. Olejnik: Simulation and Control of Tool Steel Quenching Process. 25th European Conference on Modeling and Simulation. Kraków 2011, 357-361.
- [5] Nord American Die Casting Association: Special Quality die steel & heat treatment acceptance criteria for die casting dies. Vacuum heat treatment, 2008.
- [6] FORD Motor Company, Advanced Manufacturing Development - DC2010: Die insert material and heat treatment performance requirements, 2005.
- [7] GM Powertrain Group DC-9999: Die insert material and heat treating specification, 2005.
- [8] J. Olejnik: Vacuum furnaces with high pressure charge cooling. Metallurgy 3/2002.
- [9] M. Korecki: Technical and Technological Properties of Gas Cooling in High Pressure Chamber. IX Seminarium Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej. Bukowy Dworek 2005.
- [10] J. Kowalewski, M. Korecki, J. Olejnik: Next Generation HPQ Vacuum Furnace. Heat Treating Progress 8 2008.

- [11] M. Korecki, J. Olejnik, Z. Szczerba, M. Bazel: Single-Chamber 25 bar HPGQ Vacuum Furnace with Quenching Efficiency Comparable to Oil. *Industrial Heating* 9 2009, 73-77.
- [12] M. Korecki, J. Olejnik, Z. Szczerba, M. Bazel, R. Atraszkiewicz: Piec próżniowy Seco/Warwick typ 25VPT z hartowaniem w azocie i helu pod ciśnieniem 25 bar i jego nowe możliwości technologiczne. XIII Seminarium Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej. Bukowy Dworek 2010.
- [13] M. Korecki, P. Kula, J. Olejnik: New Capabilities in HPGQ Vacuum Furnaces. *Industrial Heating* 3 2011.
- [14] L.A. Dobrzański, J. Madejski, W. Malina, W. Sitek: The prototype of an expert system for the selection of high-speed steels for cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology* 56/1-4 1996, 873-881.
- [15] L.A. Dobrzański, J. Trzaska: Application of neural network for the prediction of continuous cooling transformation diagrams. *Computational Materials Science* 30/3-4 2004, 251-259.
- [16] P. Kula, R. Atraszkiewicz, E. Wołowiec: Modern gas quenching chambers supported by SimVac Plus hardness application. *AMT Heat Treatment*, Detroit 2007.
- [17] P. Kula, M. Korecki, R. Pietrasik et al.: FineCarb - the Flexible System for Low-pressure Carburizing. New Options and Performance. *The Japan Society for Heat Treatment* 49 2009, 133-136.
- [18] W. Sitek: Methodology of high-speed steels design using the artificial intelligence tools. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 39/2 2010, 115-160.
- [19] E. Wołowiec, L. Małdziński, M. Korecki: Nowe inteligentne programy wspierające produkty Seco/Warwick. XIV Seminarium Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej. Bukowy Dworek 2011, 71-80.