

Spannungsreduzierung in metallischen Werkstücken durch Ultraschallbehandlung

Projekt

von Dr. V. Prieb

www.materialforschungsservice-dr-prieb.de

zu der Anfrage der Handelskammer Bremen

vom 16.01.2001

1. Problemstellung

1.1 Aufbau von inneren Restspannungen in metallischen Werkstücken

Bei jeder Herstellungs- und Verarbeitungsart von metallischen Werkstücken entstehen in diesen Werkstücken Innenspannungen, die einander innerhalb des Volumens eines Werkstückes ausgleichen, nach dem Ende des technologischen Verfahrens völlig oder teilweise erhalten bleiben und deswegen auch als restliche Innenspannungen oder Eigenspannungen bezeichnet werden. Die restlichen Innenspannungen sind von elastischer Natur, d. h. sie liegen unter der kritischen Spannung des plastischen Fließens.

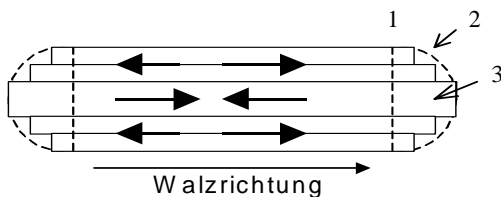


Abb. 1. Entstehung der Restspannungen in einem Metallband aufgrund verschiedener Höhenabnahme in Mittel- und Seitenschichten eines durch Tonnenwalzen gestauchten Metallbandes; 1 – Ausgangslänge, 2 – Endform und -länge, 3 – Mittelschicht beim freien Stauchen (ohne Zusammenwirken mit ihren benachbarten Schichten)

Diese makroskopischen Eigenspannungen (sogenannte Spannungen der 1. Ordnung) entstehen als Ergebnis einer ungleichen plastischen Verformung oder einer ungleichen Änderung des spezifischen Volumens in verschiedenen Bereichen des Metallkörpers. Dies kann man deutlich an einem einfachen Beispiel vom Stauchen eines Metallbandes durch Tonnenwalzen erkennen (Abb. 1).

Wenn das Metallband aus verschiedenen freien Stäben bestünde, hätte jeder Stab verschiedene Verstauchung aufgewiesen. Da das Metallband monolithisch ist und all seine Schichten miteinander verbunden sind, werden in den Mittelschichten die Druckspannungen und in Randschichten des Bandes die Zugspannungen wegen ihres elastischen Zusammenwirkens entstehen, die einander innerhalb des Bandes ausgleichen und nach dem Walzen erhalten bleiben.

1.2 Verfahrungsbestimmte Spannungsarten

Die Eigenspannungen bauen sich ebenfalls auf: bei Temperaturänderungen eines heterogenen Metallkörpers, der aus Phasen mit verschiedenen Koeffizienten der thermischen Ausdehnung besteht, bei Phasenumwandlungen zwischen Phasen mit verschiedenem spezifischem Volumen, bei einer Wärmebehandlung mit Temperaturgradienten (z. B. beim Abschrecken), beim Schweißen, Schleifen, Drehen, Fräsen usw. Je nach Verfahren werden die Eigenspannungen entsprechend als Guss-, Abschreck-, Schweißspannungen usw. bezeichnet.

1.3 Auswirkung von Eigenspannungen

Die Eigenspannungen wirken sich auf das Verhalten eines metallischen Werkstückes bei seiner Verarbeitung, Nutzung und sogar Lagerung aus. Sie können eine Formänderung (Verzug), eine nicht tolerierbare Änderung der Größe oder manchmal sogar die Zerstörung eines Werkstückes (z. B. Gussteile aus Al-Legierungen) verursachen. Ein Verzug durch Biege- oder Torsionsverformung findet bei einer spannen Formung (Schneiden, Drehen, Fräsen usw.) eines metallischen Werkstückes statt, bei der das Gleichgewicht von inneren Restspannungen im Volumen gestört wird. Wenn, z. B., von dem Band in Abb. 1 eine Randschicht abgeschnitten wird, überwiegen die Druckspannungen auf dieser Seite, und das Band wird durch die entsprechende Biegeverformung verzogen.

Eine spontane Änderung der Form bzw. der Größe findet zeitabhängig durch die Relaxation von Eigenspannungen statt. Die Relaxation hängt auch von dem Ausgangsniveau der Eigenspannungen ab, das in verschiedenen Bereichen eines Werkstückes unterschiedlich sein kann. Durch einen unterschiedlichen Grad der Relaxation in verschiedenen Bereichen des Werkstückes wird das Ausgangsgleichgewicht ebenfalls gestört, und ein neuer Ausgleich von inneren Kräften und Kraftmomenten wird erreicht, was unvermeidlich zu Verzerrungen des Werkstückes führt. Die Eigenspannungen addieren sich algebraisch mit den betriebsbedingten Außenspannungen

und sind imstande die letzten so zu verstärken, dass sogar eine nicht so große Belastung eines Werkstückes zu seinem Bruch führen kann.

2. Reduzierung von Eigenspannungen

Die überschüssige Energie in elastisch verformten Bereichen eines Werkstückes kann – ohne seine Verzerrung oder Zerstörung seiner Ganzheit – minimiert werden, wenn eine Reduzierung von schädlichen elastischen Innenspannungen durch eine lokale plastische Verformung stattfindet. Also, um eine Voll- oder Teilabnahme von Eigenspannungen zu erreichen, muss das plastische Fließen durch irgendeine Behandlung hervorgerufen werden.

Diese Bedingung liegt jeder bekannten Behandlungsmethode von metallischen Werkstücken mit Eigenspannungen vor seiner Endbearbeitung zugrunde. Eins der klassischen Verfahren ist das Glühen: Eine Wärmebehandlung, bei der hauptsächlich die elastischen Eigenspannungen vollständig, meistens aber nur teilweise relaxieren. Dies passiert auf zwei Wegen:

1. Durch die plastische Verformung, wenn die elastischen Innenspannungen τ_I die plastische Fließgrenze τ_F wenigstens in lokalen Bereichen übersteigen (überkritische Innenspannungen):

$$\tau_I(T) > \tau_F(T) \quad (1)$$

2. Durch das Kriechen, wenn diese Spannungen kleiner als die Fließgrenze sind (subkritische Innenspannungen).

$$\tau_I(T) < \tau_F(T) \quad (2)$$

2.1 Abbaumechanismus von überkritischen Eigenspannungen

Die elastischen Eigenspannungen sind nach dem Hook'schen Gesetz dem Elastizitätsmodul und der Größe der elastischen Verformung proportional. Der Elastizitätsmodul weist eine ziemlich schwache Temperaturabhängigkeit auf, dementsprechend senken die Eigenspannungen ebenfalls schwach bei einer Temperaturerhöhung (Abb. 2).

Demgegenüber fällt die Fließgrenze bei einer Temperaturerhöhung viel stärker. Bei der Temperaturerhöhung des Werkstückes über die Schnitttemperatur

$T \geq T_F$ übersteigen die Innenspannungen die Fließgrenze ($\tau_I(T) \geq \tau_F(T)$) und reduzieren sich bis auf diese Fließspannung.

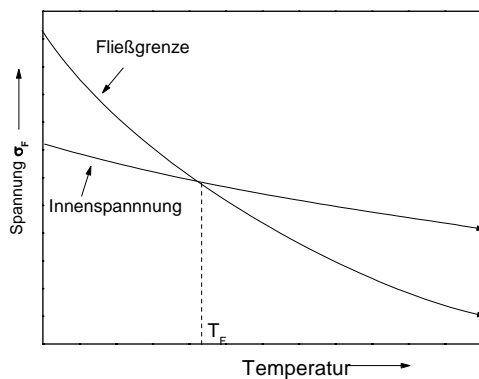


Abb. 2. Schematische Darstellung der Temperatureinwirkung auf die elastischen Innenspannungen und auf die Fließgrenze

Durch die lokalen, bei diesen Temperaturen über die Fließgrenze liegenden Innenspannungen wird eine Menge von Versetzungen generiert, d. h. eine massenhafte Multiplizierung von Versetzungen findet statt, deren Gleiten zu einer sehr schnellen plastischen Verformung führt, so dass der Abbau mehr durch die Glühentemperatur als durch die Glühendauer bestimmt wird, wobei die Eigenspannungen nur teilweise bis auf die der Glühentemperatur

entsprechende Fließgrenze abgebaut werden.

2.2 Abbaumechanismus von subkritischen Eigenspannungen

Das Kriechen bei Temperaturen $T < T_F$ (Abb. 2), bzw. bei $\tau_I(T) < \tau_F(T)$ ist ein einzig möglicher Mechanismus, elastische Innenspannungen, die kleiner als die Fließgrenze sind, in einem Werkstück zu reduzieren, in dem sich die diese Innenspannungen verursachende elastische Verformung ε_{el} mit der Zeit in die plastische Verformung ε_{pl} umwandeln kann, ohne die Gesamtverformung ε bzw. die Form des Werkstückes zu ändern:

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (3)$$

Bei diesen kleineren Spannungen findet keine massenhafte Multiplizierung und kein massenhaftes Gleiten von Versetzungen statt. Ein langsames plastisches Fließen wird durch das Gleiten einer begrenzten Zahl von leicht beweglichen Versetzungen verursacht, das sogar bei der Raumtemperatur möglich ist. Thermische Fluktuationen aktivieren allerdings das Gleiten von in den anderen nicht so günstig orientierten Gleitsystemen liegenden Versetzungen auch, sowie eine Überwindung von Hindernissen (Punktdefekte, Versetzungsgeflechte, Kristallinengrenzen usw.), an denen die leicht beweglichen Versetzungen bei ihrem Gleiten hängengeblieben sind.

Die thermischen Fluktuationen sind um so größer, je größer die Temperatur ist. Und je größer die thermischen Fluktuationen sind, desto schneller und vollständiger werden die Spannungen abgebaut (Abb. 3). Die Abbaugeschwindigkeit von In-

nenspannungen σ kann durch das Arrhenius'sche kinetische Gesetz für thermisch aktivierte Prozesse dargestellt werden:

$$\dot{\sigma} = K \exp\left(-\frac{U_P - \Delta U}{k_B T}\right), \quad (4)$$

wobei K eine vor allem von der Ausgangsspannung abhängige Konstante, U_P die für das Überwinden der Gitterreibung (Peierls-Barrieren) und das Gleiten von Versetzungen notwendige Aktivationsenergie, k_B die Boltzmannkonstante und ΔU - die Energie der thermischen Fluktuationen sind.

Also, die Abbaugeschwindigkeit ist um so größer, je größer die Ausgangsspannungen und die Glühentemperatur sind. Nach einem schnellen Abbau erreichen die Eigenspannungen so ein Sättigungsniveau, das kaum mehr von der Glühendauer abhängt (Abb. 3). Die Temperaturerhöhung für einen vollständigen Abbau von Eigenspannungen ist allerdings durch Auftreten von möglichen unerwünschten Struktur- und Phasenänderungen eingeschränkt.

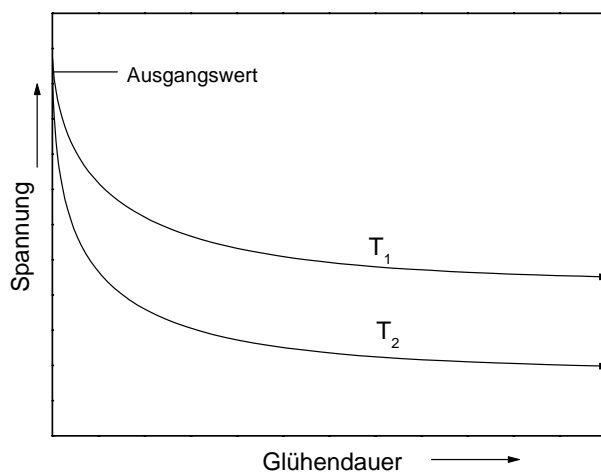


Abb. 3. Reduzierung von Restspannungen mit der steigenden Glühendauer bei zwei verschiedenen Temperaturen ($T_2 > T_1$)

Um den Abbau von Eigenspannungen zu vervollständigen, werden oft temporale Überlastungen eines Werkstückes verwendet. Die Überlastspannungen addieren sich mit Innenspannungen und führen zu ihrer plastischen Relaxation. Zu diesen Methoden gehört eine Behandlung durch Wärmezyklen, bzw. Temperaturschläge oder durch Vibrationen (z. B. Abklopfen eines Gusseisenbarrens).

3. Reduzierung von Eigenspannungen durch Ultraschallbehandlung

Alle oben betrachteten Abbaumechanismen von Eigenspannungen durch die plastische Verformung können durchaus bei der Ultraschallbehandlung eines Werkstückes realisiert werden.

3.1 Physikalische Voraussetzungen

3.1.1. Wärme- und Spannungseffekte durch die Ultraschalleinwirkung

Der Abbau von inneren Spitzenspannungen in einem Werkstück durch plastisches Fließen kann sogar bei der Raumtemperatur allein durch Addieren dieser lokalen Spitzenspannungen τ_S mit den elastischen Spannungen τ_{US} der Ultraschallschwingungen erreicht werden, die in diesem Werkstück elastische Verformungen mit einer Amplitude $\Delta\varepsilon_{US}$ [1] induzieren, wenn die folgende Bedingung:

$$\tau_S + \tau_{US} = G(\varepsilon_{el} + \Delta\varepsilon_{US}) > \tau_F(T) \quad (5)$$

erfüllt ist (Siehe Gleichung (1)).

Der weitere Abbau von Eigenspannungen erfolgt durch die plastische Verformung bei Senkung der Fließgrenze (Abb. 2) durch die Temperaturerhöhung, so dass die Bedingung (1) bzw. (5) für kleinere Innenspannungen erfüllt wird [2].

Die auch experimentell gemessene Temperaturerhöhung [3] bei der Ultraschalleinwirkung wird durch die Wärmeproduktion verursacht. Ultraschallschwingungen werden sogar im elastischen Bereich eines Metallkörpers von zeitabhängigen Relaxationsprozessen begleitet, die zur Energiedissipation führen (Abb. 4).

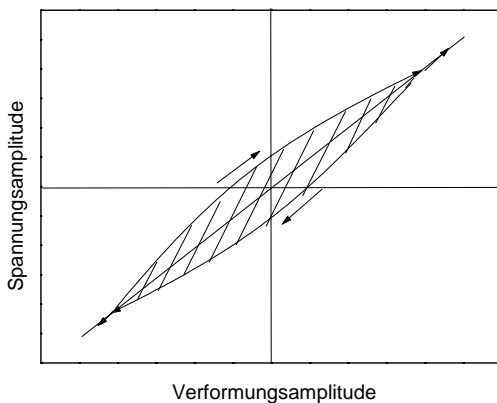


Abb. 4. Energiedissipation bei Ultraschallschwingungen eines Metallkörpers im Elastizitätsbereich

Die Fläche der in Abb. 4 gezeigten Schleife der elastischen Hysterese entspricht der während einer Schwingungsperiode als die Wärme dissipierten Energie [2, 4]. Bei einer Ultraschallfrequenz im kHz-Bereich führt sogar so eine kleine Wärmeproduktion zu einem rapiden Temperaturanstieg des Werkstückes [2, 3].

Da die schnelle plastische Verformung wie oben gezeigt kaum von der Zeit, sondern vor allem von der Temperatur und von elastischen Spannungen abhängt, reicht diese kurze Einwirkungszeit für effektiven Abbau von elastischen Eigenspannungen.

3.1.2 Ultraschallspezifische Plastifizierungseffekte

Viel wichtiger für vollständigen Abbau von subkritischen elastischen Eigenspannungen ist allerdings die weniger bekannte Einwirkung des Ultraschalls, nämlich eine Kriechbeschleunigung. Diese Beschleunigung der plastischen Verformung durch das

Kriechen hat, außer der Thermoaktivierung durch den Temperaturanstieg, folgende rein ultraschallbedingte Gründe:

1. Reibungsreduzierung [1, 5] der gleitenden Versetzungen durch die elastische Schwingungsenergie, die als ein zusätzlicher, die Peierls-Barrieren mindernder Term in die Exponentenpotenz der Gleichung (4) auftritt
2. Massenhafte Multiplizierung oder Generierung von Versetzungen [6-8] durch Aktivieren von Frank-Read-Quellen und anderen Versetzungsquellen unter den tangentialen Ultraschallspannungen
3. Massenhaftes Gleiten von Versetzungen durch Einbeziehen der durch Hindernisse geblockten und in ungünstig orientierten Gleitsystemen liegenden und durch die gesamte Ultraschalleinwirkung mobil gemachten Versetzungen
4. Ultraschallinitiierte Polygonisierung und Verkleinerung der Kornstruktur durch die Bildung von Versetzungswänden verschiedener Art (ähnlich wie die Rekristallisation bei Wärmebehandlungen).
5. Durch Ultraschall beschleunigte Diffusion in Gradienten der Innenspannungen, die zum Abbau dieser Spannungen führt.

Also, die physikalischen Grundlagen und die bereits vorhandenen experimentellen Ergebnisse sprechen für die Ultraschallbehandlung von metallischen Werkstücken als die Behandlungsmethode für den vollständigen Abbau von elastischen Eigenspannungen.

4. Ultraschalltechnik für die Behandlung von metallischen Werkstücken zwecks der Reduzierung von Eigenspannungen

Die Anwendung der Ultraschallbehandlung von metallischen Werkstücken bedarf natürlich eine spezifische dem Ziel entsprechende Ultraschalltechnik wie Ultraschallgeneratoren, Schwingersysteme usw. Diese Technik wird in der Fa. „Ultrasonics Steckmann GmbH“ seit Jahren für die Kunststoffverarbeitung [1] sowie für die Metallverarbeitung [2] entwickelt (Siehe dazu: <http://www.ultrasonics.de>).

4.1 Leistungsfähige Generatoren

Um die oben beschriebenen Ultraschalleffekte für den Abbau von elastischen Ei-

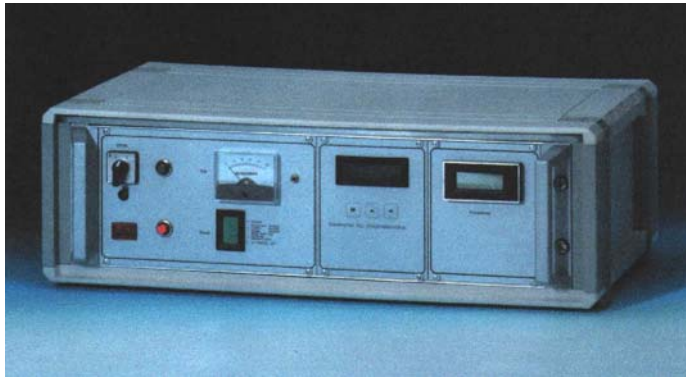


Abb. 5. Ultraschallgenerator der Fa. „Ultrasonics Steckmann GmbH“ mit einer Leistung von 3 kW

genspannungen zu schaffen, muss vor allem einem metallischen Werkstück genug Leistung zugefügt werden. Einer der von Fa. „Ultrasonics Steckmann GmbH“ entwickelten leistungsfähigen Generatoren zeigt das Foto in der Abbildung 5. Die aus dem elektrischen Netz verbrauchte Leistung beträgt bis zu 3 kW bei einer Resonanzfrequenz von ca. 20 kHz.

4.2 Ultraschallschwingersysteme

Ein Ultraschallschwingersystem besteht im allgemeinen aus dem Ultraschallwandler, dem Transformationsstück (Booster) zur Anpassung der Amplitude und der



Abb. 6. Ultraschallresonanzsysteme der Fa. „Ultrasonics Steckmann GmbH“

Sonotrode. Die von der Fa. „Ultrasonics Steckmann GmbH“ für verschiedene Zwecke entwickelten Schwinger- oder Resonanzsysteme zeigt das Foto in der Abbildung 6. Die Sonotrode hat eine Resonanzfrequenz von 20 kHz und eine Amplitude von ca. 30µm (maximale Entfernung vom Nullpunkt). Diese mechanischen Schwingungen werden auf das zu behandelnde metallische Werkstück eingebracht. Die benötigte Behandlungszeit soll im Bereich von 0,3 bis 3 Sekunden

liegen (die Zeit reichte jedenfalls für das Schweißen von zwei Metallteilen bzw. für die Plastifizierung eines metallischen Werkstückes [2]).

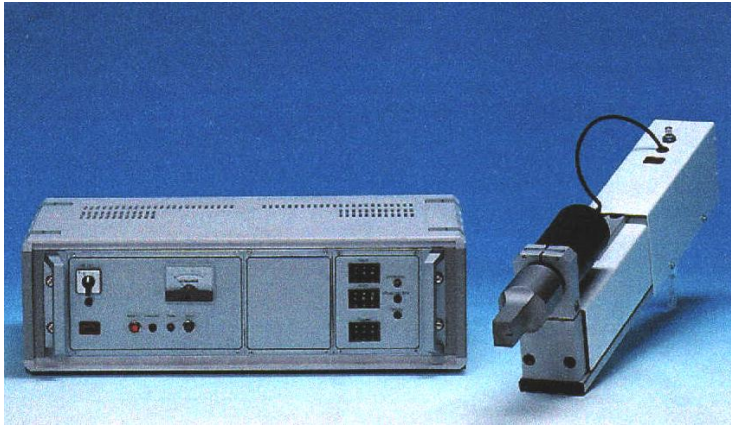


Abb. 7. Ultraschallverfahren für die Reduzierung von Eigenspannungen in metallischen Werkstücken

4.3 Verfahren

Zum Ultraschallverfahren für die Reduzierung von Eigenspannungen in metallischen Werkstücken gehören – außer der auf dem Foto in der Abbildung 7 als ein Beispiel gezeigten Ultraschalltechnik – im allgemeinen folgende

Schritte:

- Festlegen der Amplitude
- Angleichen der Anpresskraft an die Amplitude und die Generatorausgangsleistung
- Einstellen des Ultraschall-Einschaltzeitpunktes
- Einstellen der Auftreffgeschwindigkeit der Sonotrode
- Einstellen der Behandlungszeit

Das ganze Verfahren muss für die konkreten metallischen Werkstücke und verfahrensbestimmten Spannungsarten (Siehe 1.2) entwickelt werden.

5. Künftige Aufgaben und Perspektiven

All oben betrachteten Aspekte weisen darauf hin, dass es bei einer Ultraschallbehandlung von metallischen Werkstücken nicht nur einen vollständigen Abbau von elastischen Eigenspannungen, sondern auch eine Verbesserung von mechanischen Eigenschaften (z. B. durch eine Verfeinerung der Kornstruktur) zu erwarten ist. Die Ultraschallbehandlung ist auch weniger aufwendig und viel schneller als die konventionellen Verfahren, lässt sich leicht automatisieren und in andere Produktionsverfahren eingliedern.

Die für den Abbau von Eigenspannungen notwendige plastische Verformung und dementsprechend der Grad der Spannungsreduzierung in den ultraschallbehandelnden metallischen Werkstücken hängt sowohl von den einstellbaren Ultraschallparametern, als auch von der Form und den Werkstoffeigenschaften des zu behan-

delnden Werkstückes wie die Härte, die Fließspannung und ihre Temperaturabhängigkeit usw. ab. Diese Daten müssen bekannt ggf. gemessen werden, um richtige Ultraschallparameter, wie die vom Generator zugeleitete Leistung, die Wirkzeit, die Schwingungsamplitude einzustellen. Vor allem müssen dabei die Resonanzfrequenzen eines Werkstückes im voraus berechnet oder bestimmt und vermieden werden, denn der Resonanz kann zur schnellen Rissbildung und sogar Zerstörung des zu behandelnden Werkstückes führen [9]. Also, es besteht noch ein großer Untersuchungs- und Entwicklungsbedarf für die Anwendung der Ultraschallbehandlung von metallischen Werkstücken für eine Reduzierung seiner elastischen Eigenspannungen.

6. Literatur

1. Fügen von Formteilen und Halbzeugen aus thermoplastischen Kunststoffen mit Ultraschall. Verfahrens-, Konstruktions- und Anwendungsempfehlungen. Ausgabe der Fa. „Ultrasonics Steckmann GmbH“, Grävenwiesbach, 1996
2. H. Steckmann and V. Prieb. Structural aspects of metal joining and stamping using ultrasonics, „Ultrasonics“, in printing
3. J. Tsujino, T. Ueoka, Y. Asada, S. Taniguchi, Y. Iwamura. Measurement of the temperature rise at the welding surface of different metal specimens joined by a 15 kHz ultrasonic butt welding system, „Jap. J. of Appl. Phys., Part 1“, 37(1998)2996
4. V. Prieb and H. Steckmann. Pseudo-Plastic Behaviour of Single-Crystals of Cu-Base Memory Alloys. „J. de Physique IV“, 5(1995)C8-907
5. H. Steckmann, V.I. Kolomytsev, A.V. Kozlov. Acoustoplastic effect in the shape memory alloy Ni-Ti-Re at the ultrasonic frequency. „Ultrasonics“ 2133(1998) 215-218
6. N. Murdeshwar, J.E. Krzanowski. A microstructural study of dislocation substructures formed in metal foil substrates during ultrasonic wire bonding. „Metallurgical and Material Transactions A“, 28A(1997)2663-2671
7. V.E. Panin, V.A. Klimenov, V.P. Bezborodov et all. Substructural and phase transformations in ultrasound treatment of a martensitic steel. „Physics and Chemistry of Material treatment“, 27(1993)593-597
8. B. Tippelt, D. Klimm, P. Paufler. Plastic deformation of GaAs by ultrasonic treatment, „Phil. Mag. A“ 69(1994)741
9. M.R. Sriraman, R. Vasudevan. Some aspects of the damage caused in metallic materials by ultrasonic vibrations. „Journal of Materials Processing Technology“, 54(1995)47