



WIAP®

MEMV®



Metall entspannen mit Vibration

Le Soudage dans le Monde. Vol. 26, No. 11/12,
pp. 285-291, 1988 0043-2288/88 \$3.00
+.00

Imprime en Grande Bretagne Pergamon Press
plc 1989 115

Les vibrations et la relaxation des contraintes par vibration. Historique, theorie et applications pratiques

par Dr. G. Gnirss (RFA)

1. Historique

1.1. Essais sur metal non soude

C'est a partir des annees 1960 que l'on a pris de plus en plus conscience des possibilites offertes par les vibrations pour relaxer les contraintes. Ceci etait du au fait que depuis le milieu des annees 50 on avait commercialise divers types de vibreurs [1] qui devaient permettre de reduire notablement les contraintes residuelles. Des essais systematiques executes dans cet objectif par Bühler et Pfalzgraf [2] ainsi que par Zeig [3] n'ont que partiellement confirme les promesses de ces installations. Certes, il est generalement admis qu'une reduction des contraintes residuelles est possible dans le principe, mais on sait aussi que sur des pieces de formes complexes il serait difficile d'obtenir des resultats probants, mane en appliquant des vibrations a la frequence propre. Il convient de noter qu'avec des vibrations a la frequence propre, les amplitudes des contraintes sont plus grandes,

et les charges vibratoires appliquees a une temperature plus eieevee peuvent etre plus recluites. Mais il est egalement precise que ceci n'est pas recommandd, a cause des risques de rupture par fatigue. En ce temps la, on avait déjà souligne rextreme importance de l'amplitude des vibrations par rapport a leur durde. Une prise de position tout aussi prudente a egalement ete indiquee dans la Specification VDG No 1, Edition 1964, relative aux pieces moulees [5]. Les raisons qui y sont donndes reprennent les memes arguments que ci-dessus, par exemple les risques de rupture par fatigue ties aux charges de fatigue elevees, ou a une relaxation ineguliere due a la complexite des pieces.

Des essais en double, effectues en Europe de l'Est sur des couronnes en aluminium [6, 7] ont egalement montre que l'amplitude des vibrations etait d'une importance capitale, et que le niveau minimum necessaire pouvait etre obtenu avec des vibrations clans le domaine de la resonance. Lokshin a obtenu ce resultat apres avoir etudid systematiquement l'influence de la frequence, de la duree de traitement et de racceleration; il resume ses observations de la facon suivante: «Un traitement de vibration dans des conditions de resonance peut recluire efficacement les contraintes internes, surtout dans des pieces en alliages stabilises thermiquement. Il est elair qu'une relaxation locale des contraintes lors du traitement de vibration perturbe l'equilibre des macrocontraintes a l'interieur de la piece, et entraine egalement une redistribution et une reduction des contraintes". D'autres recherches ont ete menees en Russie sur la fonte grise, notamment par Adoyan [8, 9]; c'est ainsi que des charges minimales critiques ont ete determinees pour une reduction des contraintes residuelles et mises en correlation

avec le diagramme de Smith. Deux domaines ont été obtenus: un domaine dans lequel une réduction des contraintes serait possible, et un autre domaine dans lequel il faut s'attendre à des ruptures par fatigue durant le traitement de vibration. Les indications relatives à la durée du traitement confirment l'opinion répandue, selon laquelle la réduction des contraintes est forte au début, puis s'atténue. Même dans cette hypothèse, elle est toujours exprimée en heures.

Bien que jusqu'alors l'intérêt fut centré sur la réduction des contraintes, Adoyan [9] et Skazhennik [10] ont étudié la stabilité des formes affectée par les contraintes résiduelles dans le domaine de la finition des pièces moulées, ainsi que l'effet positif qu'exercent les vibrations sur ces contraintes résiduelles.

Wozny et Drawmer [11] ont utilisé des éprouvettes grenillées pour mettre en évidence l'effet d'un chargement cyclique. Leurs essais montrent que les contraintes résiduelles peuvent être modifiées lorsque le niveau des charges cycliques est assez élevé, mais qu'il est nécessaire, toutefois, que la limite d'écoulement soit dépassée. En même temps, ils soulignent l'importance de la limite d'écoulement cyclique dans la stabilisation de matériaux durcis ou adoucis dynamiquement. À partir de ces faits, ils proposent une hypothèse sur la façon de prédire le degré de réduction des contraintes résiduelles lorsque la limite d'écoulement cyclique est connue (figure 1).

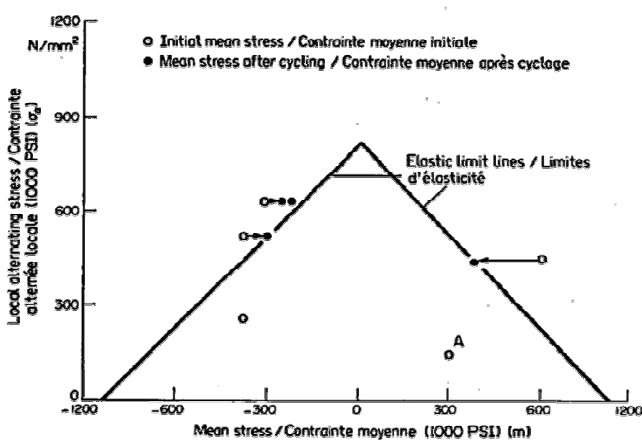


Fig. 1. Contrainte alternée locale en fonction de la contrainte moyenne

Wohlfahrt a déjà traité de l'importance de la limite d'élasticité à 0,01%. Ses recherches ont mis en évidence une réduction des contraintes résiduelles avec des amplitudes de contraintes (vibrations et contraintes résiduelles d'ordre un) inférieures à $R_{p0,01}$. Ceci peut s'expliquer par le fait que les contraintes résiduelles d'ordre deux et trois se sont superposées aux premières et qu'elles ont déjà dépassé la limite d'écoulement, même si les contraintes résiduelles d'ordre un étaient toujours inférieures à cette limite. Ils ont également souligné le fait qu'une valeur de seuil pour les contraintes vibratoires doit être dépassée, et que la réduction des contraintes résiduelles est particulièrement forte au début des sollicitations de flexion cyclique.

Une autre étude fondamentale a été décrite par Dawson et Moffat [13]. À l'aide de jauges de contraintes, ces auteurs ont également étudié le traitement de vibration ainsi que la redistribution des contraintes résiduelles provoquée par ce traitement. Ils ont induit les contraintes résiduelles en soumettant à la flexion des bandes d'acier et d'alliage d'aluminium laminées à chaud et à froid, comme Pattinson et Dugdale [14] l'avaient déjà fait, d'ailleurs. Ainsi que la littérature spécialisée l'a signalé à plusieurs reprises, ils n'ont observé aucun effet de la fréquence propre étudiée, mais ils ont, eux aussi, mis en évidence une valeur de seuil d'amplitude devant être dépassée pour qu'une relaxation des contraintes se produise. Pour une réduction quasi absolue des contraintes résiduelles, des amplitudes de l'ordre de $0,8 \times R_{p0,2}$ ont été nécessaires. Un résultat indirect a été obtenu, à savoir que la somme de l'amplitude de vibration + les contraintes résiduelles d'ordre un, peut toujours être inférieure à $R_{p0,1}$ ou souligne l'importance de la limite d'écoulement cyclique. Leurs essais confirment par ailleurs que la relaxation des contraintes résiduelles des aciers non écrouis a tendance à se produire dans la phase initiale du traitement de vibration. Ils font état d'une relaxation

superieure a 75% dans les dix premiers cycles de charge. Ceci autoriserait des traitements de courte duree (moins de 15 minutes), de sorte que les problemes de resistance a la fatigue se poseraient avec moms d'acuite, compte tenu des nombres plus reduits de cycles de charge avec les frequences couramment utilisee (<100 Hz), ces nombres de cycles etant inferieurs aux valeurs minimales de 10^6 caracterisant le domaine de la resistance a la fatigue. Ceci est important car les valeurs de seuil de l'amplitude qui ont ete etablies sont dans les limites de la resistance a la fatigue. Leurs resultats sont presentes sous la forme d'un diagramme (figure 2), qui a déjà ete utilise de facon similaire par d'autres chercheurs [11] (figure 1). Toutefois, ils se referaient a la limite d'ecoulement cyclique.

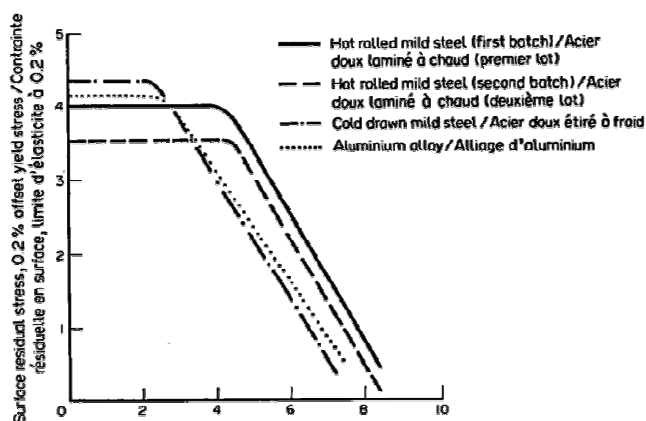


Fig. 2. Contraintes residuelles en fonction de l'amplitude de deformation cyclique

1.2. Etude des joints soudes

Une fois demontree la possibilite de relaxer les contraintes residuelles dans le metal non soude, il fallait evidemment faire la preuve que la relaxation etait egalement applicable aux joints soudes.

Malheureusement, une tentative de relaxer des contraintes residuelles produites lors du soudage d'une plaque sur un cadre s'etait soldee par un echec [11], confirmant ainsi la

difficulte de transposer a des pieces reelles les resultats obtenus avec des modeles. Les resultats escomptes par le fabricant du vibreur, a savoir une relaxation en 10 minutes, n'ont pas pu etre obtenus, meme avec des vibrations a la frequence de resonance au point de mesure choisi.

Rich [15], tout comme Bühler et Pfalzgraf l'avaient fait quelques annees plus tot [4] a montre qu'en principe les contraintes residuelles de soudage pouvaient malgre tout etre relaxees. En effet, apres 15 minutes de vibration a la premiere frequence de resonance, il a pu observer une nette relaxation des contraintes residuelles sur des bandes d'aciers ferritique et austenitique sur lesquelles des chenilles de soudure avaient ete deposees pour produire les contraintes residuelles. Les resultats qu'il a obtenus montrent que la somme des contraintes residuelles et des contraintes vibratoire etait encore inferieure a la resistance a la fatigue du diagramme de Smith. Dans le cas present, les contraintes vibratoires etaient nettement inferieures aux contraintes residuelles.

Weiss et ses co-auteurs [16] ont egalement centre leurs recherches sur les assemblages soudes. Avec des vibrations dans le domaine de la resonance a grandes amplitudes de contraintes, qui ont ete observees a l'aide de jauges de contraintes, leurs essais effectues avec des joints circulaires sur metal en feuille ont egalement mis en evidence une nette modification des contraintes residuelles radiales et axiales des le debut des vibrations. Etant donne que les contraintes residuelles etaient déjà au niveau de la limite d'ecoulement avant application des vibrations, et que des amplitudes de vibration comprises entre 50 et $100\% \times R_{p0.2}$ ont ete appliquees, on peut supposer qu'il s'est produit un fluage local. Dans le cas present, les vibrations ont dure 15 minutes, a une frequence d'environ 130 Hz. En se fondant sur les resultats obtenus, ces chercheurs indiquent egalement que ces resultats ne peuvent etre transposes qu'a des matériaux doux de meme type, sinon des problemes de tenue a la fatigue accompagnes de fissuration risqueraient de se poser. Ils soulignent egalement qu'avec des structures complexes, il est difficile, durant le traitement

de vibration, d'obtenir des amplitudes de contraintes suffisamment élevées aux points mate ou une relaxation des contraintes résiduelles est nécessaire.

Plusieurs publications [17-19] rapportent que la relaxation des contraintes par vibration peut s'appliquer pendant le soudage même. La réduction des déformations des structures soudées s'explique par la plus grande mobilité des déplacements aux températures élevées régnant pendant le soudage. Il est également important de noter que pour la relaxation des contraintes résiduelles, il n'est pas nécessaire de respecter la limite d'écoulement macroscopique technique; en effet, des déformations supérieures à 0,1% devraient certainement suffire à provoquer la déformation plastique.

2. Aspects théoriques

Pusch [20] a tenté d'expliquer ce comportement d'un point de vue métallurgique. Il signale la réduction de l'amortissement qui se produit lors de la relaxation par vibration en estimant que ce phénomène est indicatif d'une relaxation sous la forme d'une élimination des déplacements. D'après l'auteur, ce phénomène se manifeste par une réduction du courant du moteur du vibreur, et par conséquent donne des indications sur l'efficacité du traitement. Cette méthode est également appliquée à certains vibreurs pour mettre en évidence le succès des traitements.

Les hypothèses utilisées de nos jours pour expliquer la relaxation des contraintes résiduelles sont présentées brièvement dans la ref. [21], qui cite notamment l'opinion représentée par Kelso [22], selon laquelle les atomes de la matrice ou les atomes interstitiels en désordre peuvent être mis dans un état stable grâce à une énergie extérieure, ce qui revient à une modification de l'état des contraintes résiduelles, ce phénomène pouvant être provoqué par un chauffage ou une vibration mécanique. L'opinion la plus répandue est celle qui suppose que la somme des contraintes résiduelles et des contraintes

vibratoires dépasse la limite d'écoulement, de sorte qu'il se produit une déformation plastique avec la relaxation des contraintes résiduelles. Dans le cas présent, une distinction est faite entre les matériaux qui durcissent cycliquement et ceux qui s'adoucissent cycliquement.

Sudnik et Jarlyko proposent une autre théorie, dans laquelle ils donnent la prééminence à l'écoulement microplastique, en l'illustrant à l'aide d'un diagramme de fatigue normalisé (figure 3).

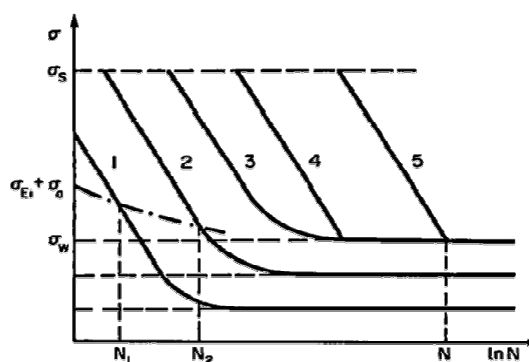


Fig. 3. Diagramme global de fatigue et cinétique de la relaxation des contraintes. 1. Courbe d'amorçage de l'écoulement microscopique; 2. Courbe d'amorçage de recoulement macroscopique; 3. Courbe de fin d'écoulement macroscopique; 4. Courbe d'amorçage de ruptures submicroscopiques; 5. Courbe de rupture par fatigue: δ_{Ei} = contraintes résiduelles; δ_a = contraintes vibratoires

Sous l'effet des contraintes résiduelles et des contraintes vibratoires qui leur sont superposées, il se produit, après un nombre suffisant de cycles N_1 , un écoulement microplastique qui, sous l'effet d'autres vibrations, conduit à une relaxation des contraintes résiduelles. Plus l'amplitude des vibrations est grande, plus la relaxation est importante. D'après ces auteurs, la vibration doit être stoppée à N_2 au plus tard pour éviter les dommages par fatigue.

3. Domaines d'application

Les auteurs envisagent des domaines d'application de la relaxation par vibration non seulement pour la relaxation des contraintes résiduelles de traction afin d'éviter les ruptures fragiles, mais aussi pour les cas où une relaxation de contraintes résiduelles en surface est nécessaire compte tenu des risques de fissuration par corrosion sous tension et où l'on cherche la stabilité des formes lors de l'usinage. En ce qui concerne cette dernière application, de bons résultats ont été signalés récemment [23-25], mais aussi des échecs [26].

Une application industrielle de la relaxation par vibration est décrite dans la ref. [27]. La comparaison des contraintes résiduelles dans des boîtes de vitesses traitées par vibration, ou non traitées, ou traitées thermiquement, a montré que les boîtes non traitées thermiquement présentaient le niveau de contraintes de loin le plus élevé; les contraintes dans les boîtes traitées thermiquement n'atteignaient que 17%, tandis que celles des boîtes traitées par vibration atteignaient environ 35%. L'effet positif du traitement par vibration était donc clairement démontré.

Une autre étude a été décrite plus récemment [28]. Elle concerne des essais dans lesquels des soudures circonférentielles de portions de tubes à l'état non traité thermiquement ont fait l'objet d'une étude comparative après relaxation des contraintes et après traitement par vibration pendant et après le soudage. Succinctement, on peut dire que, comme prévu, le traitement de vibration a permis d'améliorer la stabilité dimensionnelle des tubes après leur mise en service.

Bien que les caractéristiques de ténacité de la zone thermiquement affectée semblent indiquer que la température de transition ductile - fragile diminue légèrement sous l'effet du traitement de vibration, les valeurs de CTOD influencées par la relaxation des contraintes résiduelles étaient accrues. Comme il était à prévoir, la dureté n'a pas été affectée. Toutefois, en évaluant les résultats, il convient de noter que les modifications des

caractéristiques ne sont pas étayées statistiquement.

La ref. [34] représente la publication la plus récente décrivant une stabilisation dimensionnelle obtenue par vibration, ainsi que la théorie qui la sous-tend. L'auteur n'a pas observé une forte réduction des contraintes dues au soudage, mais signale par contre un effet très net sur la stabilité dimensionnelle. Le mécanisme qui est à l'origine de ces phénomènes semble être non pas la somme des contraintes internes et des contraintes vibratoires qui vont jusqu'à 50 MPa, mais plutôt un effet comparable au vieillissement naturel.

Une autre étude récente [35] traite de la relaxation des contraintes de la stabilité dimensionnelle, et de l'effet exercé sur la ténacité et la résistance à la fatigue par la relaxation par vibration. Les résultats, là encore, montrent que la forme des constructions est stabilisée et qu'il n'y a pas d'effet négatif sur la résistance mécanique, la ténacité et la tenue en fatigue. La relaxation par vibration est également proposée et utilisée pour relaxer les contraintes résiduelles. Malheureusement, les conditions limites que l'on doit avoir présentes à l'esprit ne sont pas assez clairement indiquées.

Il est impossible de faire une évaluation critique de la plupart des résultats publiés dans la littérature car ils sont insuffisamment précis. C'est ainsi, par exemple, que la portée des descriptions reprises dans les ref. [29-33] est malheureusement limitée.

4. Resume

En nous fondant sur les points de vue qui prevalent actuellement, nous pouvons faire les remarques suivantes, en guise de resume:

1. Les domaines d'application de la relaxation des contraintes par vibration sont les suivants:

- (a) stabilisation dimensionnelle lors de l'usinage
- (b) prevention de la fissuration par corrosion sous tension grace a une reduction des contraintes superficielles de traction
- (c) reduction des risques inherents au soudage
- (d) reduction du niveau des contraintes residuelles dans les structures soudees.

2. Si l'on doit obtenir une importante reduction du niveau des contraintes residuelles, il n'est pas indispensable d'avoir des valeurs minimales bien definies pour les amplitudes de contraintes lors de la relaxation par vibration. Avec les appareils de relaxation disponibles, celles-ci ne sont probablement atteintes qu'a la frequence de resonance.

3. S'il faut relaxer des pieces completes ou des assemblages soudes, les vibrations doivent etre appliquees avec plusieurs frequences sinon les amplitudes de contraintes necessaires ne peuvent etre obtenues qu'en certains points des pieces traitees.

4. Si une reduction de contraintes residuelles est realisee avec de grandes amplitudes en un nombre de cycles plus reduit, alors la duree de vibration peut etre courte pour minimiser les problemes de resistance a la fatigue. Ceci resulte en particulier du fait qu'il est impossible de prevoir le niveau des amplitudes de contraintes obtenu dans la piece. En general, pour des raisons economiques, il n'est pas judicieux de verifier a l'aide de jauges de contraintes.

5. La reduction de l'amortissement pourrait etre prise comme mesure de l'effet global de la

vibration. Toutefois, elle ne fournit aucune information sur la relaxation des joints soudes.

6. Etant donne que l'efficacite du traitement de vibration peut etre demontree assez aisement par l'amelioration de la stability dimensionnelle lors de l'usinage, cette methode est appliquee dans ce dernier domaine avec des resultats positifs. Toutefois, de nombreuses questions restent sans reponse. Si l'on recherche des objectifs precis tels que "la relaxation pour ameliorer la corrosion ou la tenacite apres soudage" ou bien "la reduction des risques de fissuration lors du soudage", alors on peut dire que la methode n'a pas encore fait de progres significatifs car la transposition, aux pieces industrielles, des resultats positifs obtenus en laboratoire reste encore trop problematique. Ainsi, par exemple, nous ne connaissons pas les amplitudes des vibrations obtenues localement, et la relaxation des contraintes residuelles n'est pas quantifiable. C'est pour cette raison que la Specification DVS 1002, Partie 2, 1986 [34] consacree a la "Relaxation des contraintes residuelles de soudage" exprime clairement un doute quant a la possibilite d'une application pratique de la relaxation des assemblages soudes.

Dans ce contexte, meme en controlant le courant du moteur, la methode ne peut etre utilisee que pour les fabrications en serie oft l'on peut toujours supposer que les pieces sont identiques apres une etude fondamentale d'une piece-type. Des conditions tout aussi favorables pourraient egalement s'appliquer aux soudures circonferentielles sur tubes.

References

- [1] E. Enke: Spannungsfreies Altern durch Rütteln/ Stress relieving by vibration/ Relaxation des contraintes par vibration. *Maschinenmarkt*, Vol. 61, No. 66, pp. 37-38, 1955..
- [2] H. Bühler, H. Pfalzgraf: Untersuchungen über den Abbau von Eigenspannungen in Gusseisen und Stahl durch mechanisches Rütteln und Langzeitauslagerung im Freien/Study of residual stress relief in iron and steel by means of vibration and long term ageing in air/Etude de la relaxation des contraintes résiduelles dans la fonte et l'acier par vibration et vieillissement a long terme a l'air. VDI-Forschungsheft 494, 1962.
- [3] K. Zeig: Rüttelentspannen oder Spannungsarmglühen?/Stress relieving by vibration or heat treatment?/Relaxation des contraintes par vibration ou traitement thermique? *Maschinenbau-technik*, Vol. 11, No. 5, pp. 423-429, 1962.
- [4] H. Bühler, H. Pfalzgraf: Untersuchungen über die Verminderung von Schweissspannungen durch mechanisches Rütteln/ Studies of weld residual stress relieving by vibration/Etude de la relaxation, par vibration, des contraintes résiduelles de soudage. *Schweissen und Schneiden*, Vol. 16, No. 5, pp. 178-183, 1964.
- [5] Abbau von Eigenspannungen in Gussstücken aus Gusseisen mit Lamellengraphit/Residual stress relieving of castings in grey iron/Relaxation des contraintes résiduelles dans des pieces moulees en fonte grise. VDG-Merkblatt N 1, 1964.
- [6] J. Lokshin: Vibration treatment and dimensional stabilisation of castings/ Relaxation par vibration et stabilisation dimensionnelle des pieces mouldes. *Russian Castings Production*, No. 10, pp. 454-457, 1965.
- [7] J. Lokshin: Schwingungseinwirkung und Stabilisierung von Gussstückabmessungen./Vibration treatment and dimensional stabilization of castings/ Relaxation par vibration et stabilisation dimensionnelle des pieces mouldes. *Litejnoe Proisvodstvo J.*, No. 10, pp. 38-41, 1965.
- [8] G. Adoyan *et al.*: Basic factors in the vibration of iron castings/Facteurs fondamentaux du traitement par vibration des pieces moulees en fonte. *Russian Castings Production*, No. 3, pp. 129-132, 1966.
- [9] G. Adayan: The vibratory stress relieving of castings/ Relaxation, par vibration, des contraintes dans des pieces moulees. *Machines and Tooling*, Vol. 38, No. 8, pp. 18-22, 1967.
- [10] V. Skazhennik *et al.*: Vibration ageing of iron castings/Vieillessement par vibration de pieces moulees en fonte. *Russian Castings Production*, No. 7, pp. 304-305, 1967.
- [11] G. Wozney, Crawmer: An Investigation of vibrational stress relief in steel/Etude de la relaxation de l'acier u l'aide de vibrations. *Welding Research Suppl.* Vol. 47, No. 9, pp. 411s-419s, 1968.
- [12] H. Wohlfahrt: Zum Eigenspannungsabbau bei der Schwingungsbeanspruchung von Stählen/Study of residual stress relief of steels by vibration/Etude de la relaxation des contraintes résiduelles dans des aciers soumis a des vibrations. *Härtereitechn. Mitteilungen*, Vol. 28, Nov., pp. 288-293, 1973.
- [13] R. Dawson, D. Moffat: Vibratory stress relief: a fundamental study of its effectiveness/Etude fondamentale de l'efficacite de la relaxation par vibration. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 102, No. 4, pp. 169-176, 1980.
- [14] E.J. Pattinson, D.S. Dugdale: Fading of residual stresses due to repeated loading/Reduction des contraintes résiduelles sous l'effet de sollicitations repetees. *Metallurgia*, pp. 228-229, Nov. 1962.
- [15] S. Rich: Quantitative measurement of vibratory stress relief/Mesure quantitative de la relaxation des contraintes par vibration. *Weld. Engineer*, No. 3, pp. 44-45, 1969.
- [16] S. Weiss: Vibrational stress relief in a plain carbon steel weldment/Relaxation, par vibration, des contraintes résiduelles dans un assemblage soude en acier

- ordinaire. *Weld. Res. Suppl.* No. 2, pp. 47s-51s, 1976.
- [17] Vibratory stress relieving/Relaxation des contraintes par vibration. *Welding and Metal Fabrication*, No. 6, pp. 212-215, 1968.
- [18] A vibration shakedown/Relaxation des contraintes par vibration. *Welding Design and Fabrication*, No. 4, pp. 81-93, 1969.
- [19] B. Anzulovic: Analysis of vibrational stress relieving/ Analyse de la relaxation des contraintes par vibration. Ohio State University, 1976.
- [20] H. Pusch: Das Vibrationsverfahren zur Reduktion von Eigenspannungen/ Vibratory treatment for residual stress relieving/Application de vibrations pour reduire les contraintes residuelles. *Maschinenwelt-Elektrotechnik*, 8, pp. 136-159, 1976.
- [21] Residual stress relief in welded structures by vibration treatment/ Relaxation, par vibration, des contraintes residuelles dans des structures soudees. Doc X-1057-83 de l'IIS/of the IIW.
- [22] T.D. Kelso: Stress relief by vibration/Relaxation des contraintes par vibration. *The Tool and Manufacturing Engineer*, Vol. 61, No. 9, pp. 48-49, 1968.
- [23] P. Sedek: Können mechanische Schwingungen das Spannungsarmglühen geschweisster Maschinenelemente ersetzen?/Can mechanical vibration replace the thermal treatment in the stress relieving of welded machine parts?/Les vibrations peuventelles remplacer le traitement thermique pour la relaxation d'elements mecaniques soudees? *Schweissen und Schneiden*, Vol. 35, No. 10, pp. 483-486, 1983.
- [24] E. Dobler: Abbau von Eigenspannungen durch Vibration/Stress relief by means of vibration/Relaxation des contraintes par vibration. *Werkstatt und Betrieb*, Vol. 114, No. 7, pp. 459-461, 1981.
- [25] R. Stein: Toleranzeinhaltung bei schweren Präzisionsmaschinenteilen (private Mitteilung)/How to meet tight tolerance requirements in large-size precision machine parts (private report)/Respect des tolerances sur des gros elements de machines de precision (communication privee)
- [26] R. Turk: Entspannen durch Riitteln ist mehr als ein Wunschtraum/Possibilities and limitations of stress relief by vibration/Les possibilites et les limites de la relaxation par vibration. *Praktiker*, Vol. 32, No. 6, 175-176, 1980.
- [27] Private Mitteilung der Deutschen Babcock AG. Bericht Nr. Wzq 15 83-25/Private Report of Deutsche Babcock Co., Report No. Wzq 15 83-25/Communication privee, Deutsche Babcock AG, Rapport N° Wzq 15 83-25.
- [28] Gutachten von Det Norske Veritas, Bericht Nr. 84-3060 (1984)/Experts Report of Det Norske Veritas, No. 84-3060 (1984)/Rapport d'expertise, Det Norske Veritas, N° 84-3060 (1984).
- [29] R. Claxton: Vibration gives relief in times of stress/Les vibrations permettent de relaxer les contraintes. *Metal Working Production*, No. 5, pp. 89-92, 150, 1976.
- [30] R. Stein: Schweissen von Holmen für eine 50 MN-Blechformpresse als Beispiel des Schwermaschinenbaues. DVS-Bericht Band 65/Welding in heavy mechanical engineering as exemplified by the crossbeams of a 50 MN plate forming press. Vol. 65 of the Collection DVS-Berichte/Le soudage des traverses d'une presse 6 toles de 50 MN: exemple interessant dans le domaine de la construction mecanique. Vol. 65 de la Collection DVS-Berichte.
- [31] A. Rappen: Verringerung von Schweißspannungen durch Vibration zur Erzielung von Mass- und Formgenauigkeit von Maschinenteilen. DVS-Bericht Band 74, S. 191-202/ Reduction of weld residual stresses by vibration for size and form stability of machine parts. Vol. 74 of the Collection DVS-Berichte, pp. 191-202/Reduction, par vibration, des contraintes residuelles de soudage pour stabiliser les dimensions et les formes d'elements mecaniques. Vol. 74 de la Collection DVS-Berichte, pp. 191-202.
- [32] T. Kelso: Stress relief by vibration/ Relaxation des contraintes par vibration. *The Tool and Manufacturing Engineer*, No. 9, pp. 48-49, 1968.

- [33] D. Dreger: Good vibes reduce stresses in metal parts/Les bonnes vibrations reduisent les contraintes dans des pieces metalliques. *Machine Design*, Vol. 8, No. 6, pp. 100-103, 1978.
- [34] P. Sedek: Vibratory stabilization of welded construction. Experiments and conclusions. Proc. of IIW-Conference 1987 on Stress Relieving Heat Treatment of Welded Construction/Stabilisation de constructions soudees a l'aide de vibrations. Experiences et conclusions. Conference de l'IIS 1987 sur les Traitements Thermiques de Relaxation des Constructions soudees.
- [35] M. Jesensky: Vibratory lowering of residual stresses in weldments. Proc. of IIW Conference 1987 on Stress Relieving Heat Treatment of Welded Constructions/Reduction, par vibration, des contraintes residuelles dans les assemblages soudes. Conference de l'IIS 1987 sur les Traitements Thermiques de Relaxation des Constructions soudees.