

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

par Dr. G. Gnirss (RFA)

1. Historique

1.1. Essais sur métal non soudé

C'est à partir des années 1960 que l'on a pris de plus en plus conscience des possibilités offertes par les vibrations pour relaxer les contraintes. Ceci était dû au fait que depuis le milieu des années 50 on avait commercialisé divers types de vibreurs [1] qui devaient permettre de réduire notablement les contraintes résiduelles. Des essais systématiques exécutés dans cet objectif par Bühler et Pfalzgraf [2] ainsi que par Zeig [3] n'ont que partiellement confirmé les promesses de ces installations. Certes, il est généralement admis qu'une réduction des contraintes résiduelles est possible dans le principe, mais on sait aussi que sur des pièces de formes complexes il serait difficile d'obtenir des résultats probants, même en appliquant des vibrations à la fréquence propre. Il convient de noter qu'avec des vibrations à la fréquence propre, les amplitudes des contraintes sont plus grandes, et les charges vibratoires appliquées à une température plus élevée peuvent être plus réduites. Mais il est également précisé que ceci n'est pas recommandé, à cause des risques de rupture par fatigue. En ce temps là, on avait déjà souligné l'extrême importance de l'amplitude des vibrations par rapport à leur durée. Une prise de position tout aussi prudente a également été indiquée dans la Spécification VDG N° 1, Edition 1964, relative aux pièces moulées [5]. Les raisons qui y sont données reprennent les mêmes arguments que ci-dessus, par exemple les risques de rupture par fatigue liés aux charges de fatigue élevées, ou à une relaxation irrégulière due à la complexité des pièces.

Des essais en double, effectués en Europe de l'Est sur des couronnes en aluminium [6, 7] ont également montré que l'amplitude des vibrations était d'une importance capitale, et que le niveau minimum nécessaire pouvait être obtenu avec des vibrations dans le domaine de la résonance. Lokshin a obtenu ce résultat après avoir étudié systématiquement l'influence de la fréquence, de la durée de traitement et de l'accélération; il résume ses observations de la façon suivante: "Un traitement de vibration dans des conditions de résonance peut réduire efficacement les contraintes internes, surtout dans des pièces en alliages stabilisés thermiquement. Il est clair qu'une relaxation locale des contraintes lors du traitement de vibration perturbe l'équilibre des macrocontraintes à l'intérieur de la pièce, et entraîne également une redistribution et une réduction des contraintes". D'autres recherches ont été menées en Russie sur la fonte grise, notamment par Adoyan [8, 9]; c'est ainsi que des charges minimales critiques

ont été déterminées pour une réduction des contraintes résiduelles et mises en corrélation 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 fût 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.

Woznay et Drawmer [11] ont utilisé des éprouvettes grenailées 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. A 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).

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]. A 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

Doc. IIS/IIW-952-87 (ex doc. XI-480-86) présenté à la Commission XI "Récipients à pression, chaudières et tuyauteries" de l'IIS.

G. Gnirss est un membre de la délégation de la République Fédérale d'Allemagne.

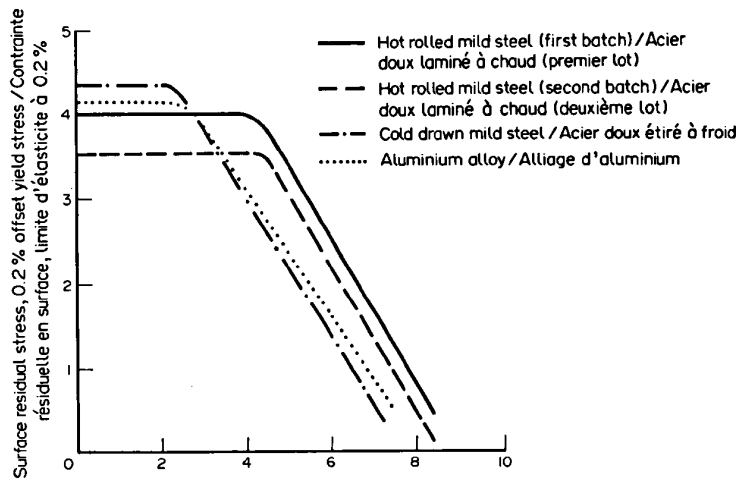


Fig. 2. Residual stress as a function of the cyclic strain amplitude / Contraintes résiduelles en fonction de l'amplitude de déformation cyclique

ont, eux aussi, mis en évidence une valeur de seuil d'amplitude devant être dépassé 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 $R_{p0,2}$, ce que indique un microfluage dans le domaine $R_{p0,1}$ 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 supérieure à 75% dans les dix premiers cycles de charge. Ceci autoriserait des traitements de courte durée (moins de 15 minutes), de sorte que les problèmes de résistance à la fatigue se poseraient avec moins d'acuité, compte tenu des nombres plus réduits de cycles de charge avec les fréquences couramment utilisée (< 100 Hz), ces nombres de cycles étant inférieurs aux valeurs minimales de 10^6 caractérisant le domaine de la résistance à la fatigue. Ceci est important car les valeurs de seuil de l'amplitude qui ont été établies sont dans les limites de la résistance à la fatigue. Leurs résultats sont présentés sous la forme d'un diagramme (figure 2), qui a déjà été utilisé de façon similaire par d'autres chercheurs [11] (figure 1). Toutefois, ils se réfèrent à la limite d'écoulement cyclique.

1.2. Etude des joints soudés

Une fois démontrée la possibilité de relaxer les contraintes résiduelles dans le métal non soudé, il fallait évidemment faire la preuve que la relaxation était également applicable aux joints soudés.

Malheureusement, une tentative de relaxer des contraintes résiduelles produites lors du soudage d'une plaque sur un cadre s'était soldée par un échec [11], confirmant ainsi la difficulté de transposer à des pièces réelles les résultats obtenus avec des modèles. Les résultats escomptés par le fabricant du vibreur, à savoir une relaxation en 10 minutes, n'ont pas pu être obtenus, même avec des vibrations à la fréquence de résonance au point de mesure choisi.

Rich [15], tout comme Bühler et Pfalzgraf l'avaient fait quelques années plus tôt [4] a montré qu'en principe les

contraintes résiduelles de soudage pouvaient malgré tout être relaxées. En effet, après 15 minutes de vibration à la première fréquence de résonance, il a pu observer une nette relaxation des contraintes résiduelles sur des bandes d'aciers ferritique et austénitique sur lesquelles des chenilles de soudure avaient été déposées pour produire les contraintes résiduelles. Les résultats qu'il a obtenus montrent que la somme des contraintes résiduelles et des contraintes vibratoires était encore inférieure à la résistance à la fatigue du diagramme de Smith. Dans le cas présent, les contraintes vibratoires étaient nettement inférieures aux contraintes résiduelles.

Weiss et ses co-auteurs [16] ont également centré leurs recherches sur les assemblages soudés. Avec des vibrations dans le domaine de la résonance à grandes amplitudes de contraintes, qui ont été observées à l'aide de jauges de contraintes, leurs essais effectués avec des joints circulaires sur métal en feuille ont également mis en évidence une nette modification des contraintes résiduelles radiales et axiales dès le début des vibrations. Etant donné que les contraintes résiduelles étaient déjà au niveau de la limite d'écoulement avant application des vibrations, et que des amplitudes de vibration comprises entre 50 et $100\% \times R_{p0,2}$ ont été appliquées, on peut supposer qu'il s'est produit un fluage local. Dans le cas présent, les vibrations ont duré 15 minutes, à une fréquence d'environ 130 Hz. En se fondant sur les résultats obtenus, ces chercheurs indiquent également que ces résultats ne peuvent être transposés qu'à des matériaux doux de même type, sinon des problèmes de tenue à la fatigue accompagnés de fissuration risqueraient de se poser. Ils soulignent également qu'avec des structures complexes, il est difficile, durant le traitement de vibration, d'obtenir des amplitudes de contraintes suffisamment élevées aux points même où 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 réf. [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). 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 réf. [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 circonferentielles 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 réf. [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 résumées dans les réf. [29-33] est malheureusement limitée.

4. Résumé

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

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

- (a) stabilisation dimensionnelle lors de l'usinage
- (b) prévention de la fissuration par corrosion sous tension grâce à une réduction des contraintes superficielles de traction
- (c) réduction des risques inhérents au soudage
- (d) réduction du niveau des contraintes résiduelles dans les structures soudées.

2. Si l'on doit obtenir une importante réduction du niveau des contraintes résiduelles, il n'est pas indispensable d'avoir des valeurs minimales bien définies pour les amplitudes de contraintes lors de la relaxation par vibration. Avec les appareils de relaxation disponibles, celles-ci ne sont probablement atteintes qu'à la fréquence de résonance.

3. S'il faut relaxer des pièces complètes ou des assemblages soudés, les vibrations doivent être appliquées avec plusieurs fréquences sinon les amplitudes de contraintes nécessaires ne peuvent être obtenues qu'en certains points des pièces traitées.

4. Si une réduction de contraintes résiduelles est réalisée avec de grandes amplitudes en un nombre de cycles plus réduit, alors la durée de vibration peut être courte pour minimiser les problèmes de résistance à la fatigue. Ceci résulte en particulier du fait qu'il est impossible de prévoir le niveau des amplitudes de contraintes obtenu dans la pièce. En général, pour des raisons économiques, il n'est pas judicieux de vérifier à l'aide de jauges de contraintes.
5. La réduction de l'amortissement pourrait être prise comme mesure de l'effet global de la vibration. Toutefois, elle ne fournit aucune information sur la relaxation des joints soudés.
6. Etant donné que l'efficacité du traitement de vibration peut être démontrée assez aisément par l'amélioration de la stabilité dimensionnelle lors de l'usinage, cette méthode est appliquée dans ce dernier domaine avec des résultats positifs. Toutefois, de nombreuses questions restent sans réponse. Si l'on recherche des objectifs précis tels que "la relaxation pour améliorer la corrosion ou la ténacité après

soudage" ou bien "la réduction des risques de fissuration lors du soudage", alors on peut dire que la méthode n'a pas encore fait de progrès significatifs car la transposition, aux pièces industrielles, des résultats positifs obtenus en laboratoire reste encore trop problématique. Ainsi, par exemple, nous ne connaissons pas les amplitudes des vibrations obtenues localement, et la relaxation des contraintes résiduelles n'est pas quantifiable. C'est pour cette raison que la Spécification DVS 1002, Partie 2, 1986 [34] consacrée à la "Relaxation des contraintes résiduelles de soudage" exprime clairement un doute quant à la possibilité d'une application pratique de la relaxation des assemblages soudés.

Dans ce contexte, même en contrôlant le courant du moteur, la méthode ne peut être utilisée que pour les fabrications en série où l'on peut toujours supposer que les pièces sont identiques après une étude fondamentale d'une pièce-type. Des conditions tout aussi favorables pourraient également s'appliquer aux soudures circonférentielles sur tubes.

24. E. Döbler: 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 tolérances sur des gros éléments de machines de précision (communication privée).

26. R. Türk: Entspannen durch Rütteln ist mehr als ein Wunschtraum/Possibilities and limitations of stress relief by vibration/Les possibilités 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 privée, 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 à tôles de 50 MN:

exemple intéressant dans le domaine de la construction mécanique. 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/Réduction, par vibration, des contraintes résiduelles de soudage pour stabiliser les dimensions et les formes d'éléments mécaniques. 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 réduisent les contraintes dans des pièces métalliques. *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 soudées à l'aide de vibrations. Expériences et conclusions. Conférence de l'IIS 1987 sur les Traitements Thermiques de Relaxation des Constructions soudées.

35. M. Jesensky: Vibratory lowering of residual stresses in weldments. Proc. of IIW Conference 1987 on Stress Relieving Heat Treatment of Welded Constructions/Réduction, par vibration, des contraintes résiduelles dans les assemblages soudés. Conférence de l'IIS 1987 sur les Traitements Thermiques de Relaxation des Constructions soudées.